

設計知識操作論

吉岡真治

①

平成七年度博士論文

設計知識操作論

指導教官 富山哲男 助教授



東京大学大学院工学系研究科

精密機械工学専攻

工 37066

吉岡 真治

概要

本研究は設計過程において設計者が作り出す情報を設計知識の操作という観点から考察するものである。設計とは人間がその持てる知識を利用して行なう創造的活動であり、その過程では多くの情報が生み出される。これらの設計に用いられる知識を集約し、そこで生み出された情報を記録することにより機械のライフサイクル全般に関わる作業の支援を行なう知識集約型工学のための枠組 (Knowledge Intensive Engineering Framework) の開発のためには、実際の設計者による設計知識に対する操作およびその結果として生み出された情報に対する記述の定式化が必要である。そこで、本研究では、この設計知識操作の定式化および、その操作を計算機上で実現する方法を提案する。

そのために、本研究では、位相集合論に基づいた抽象概念の操作として設計を公理的に定式化した一般設計学の枠組、およびその拡張である Refinement 設計過程モデルを基礎として、実際の設計過程における設計者の設計知識操作を分析する。一般設計学および Refinement 設計過程モデルにおいて設計とは機能、物理現象、属性といった実体から得られる抽象概念の操作として定式化されている。そこで本研究では、模擬的な設計である設計実験の結果を分析することにより実際に設計者が行なっている設計知識操作をこれらの抽象概念の操作として定式化する。さらに、この設計知識操作を実現するために必要な設計対象表現について考察し、複数の設計対象モデルを利用する枠組を提案する。また、この複数の設計対象モデルを利用するために、設計対象を計算機上でモデリングする際に行なう操作について分析を行なう。

次に、設計者の作り出した情報の基礎となる設計者の意図の記録について考察する。そのために、まず設計者の設計対象に対する主観的表現である機能モデリングについて概観するとともに、設計過程の分析から得られた設計知識操作である設計者の意思決定過程の表現手法を提案する。本研究では、顧客要求が設計者の意思決定に大

大きく影響を与えていると考え、顧客要求を参照した意思決定の過程を支援し記録する枠組みを提案する。

また、この設計知識操作および設計者の意思決定情報に関する分析の結果に基づいたCADシステムを提案する。このシステムは、設計知識操作の分析に基づいた設計過程管理システム、設計者の意思決定情報記録システムおよび複数の設計対象モデルを統合的に利用する枠組みであるブラガブル・メタモデル機構から構成される。ブラガブル・メタモデル機構とは、計算機上に既に実現されている設計支援ツールについて、そこで用いられている概念を知識として記述することにより統合的に利用する枠組である。また、この枠組では、先に述べた設計対象をモデリングする際に行なう操作を扱うことにより設計者のモデリング過程を支援する。

また、このCADシステムを、設計実験のプロトコルを再現する設計シミュレーションおよびコピー機の設計事例に適用することにより、その有効性を検証する。

最後に、本論文の結論を述べ、知識集約型工学への展望を述べる。

目次

1 序言	1
1.1 本研究の目的	2
1.2 本論文の構成	5
1.3 設計研究	7
1.3.1 設計方法論	7
1.3.2 計算機による設計支援	9
1.3.3 本研究の方法	10
2 一般設計学とその展開	13
2.1 一般設計学	15
2.1.1 公理系	15
2.1.2 理想的知識	16
2.1.3 現実的知識	19
2.2 Refinement 設計過程モデル	25
2.2.1 設計実験	25
2.2.2 一般設計学と設計実験の整合性	30

3 設計知識操作論	33
3.1 設計実験の結果に基づく設計知識操作の定式化	35
3.1.1 設計過程における実体概念	35
3.1.2 実体概念を媒介とする設計仕様の明確化	41
3.1.3 実体概念を用いた機能設計	47
3.1.4 実体概念を媒介とした知識の導入	54
3.1.5 設計過程における意思決定プロセス	56
3.1.6 設計知識操作論の一般性	59
3.2 設計知識操作論に基づく設計過程モデル	64
3.3 設計対象表現	67
3.3.1 設計対象表現	67
3.3.2 設計対象モデル操作知識	68
3.4 3章のまとめ	74
4 設計者の意図の記述	75
4.1 機能モデリング	77
4.1.1 機能モデリングの研究	77
4.1.2 FBS モデリング	78
4.1.3 品質機能展開	81
4.2 機能およびその評価基準の記述	86
4.2.1 品質機能展開法の FBS モデラへの応用	86
4.3 FBS モデリングの拡張	93
4.3.1 機能間の制約条件の表現	93

4.3.2	階層的な FBS モデリング	97
4.3.3	解候補の比較	100
4.4	4 章のまとめ	101
5	設計知識操作論に基づく CAD システム	102
5.1	システムの構成	104
5.2	複数の設計対象モデルの統合	106
5.2.1	設計対象表現の統合化	106
5.2.2	メタモデル機構	107
5.3	プラグブル・メタモデル機構の提案	110
5.3.1	メタモデルにおける属性概念の表現	112
5.3.2	設計対象モデラの接続	113
5.3.3	プラグブル・メタモデル機構の実現	114
5.3.4	モデリングの支援	117
5.4	設計知識操作論に基づく設計過程管理システム	123
5.4.1	設計知識操作と対象レベルの操作	123
5.4.2	設計過程知識の表現	124
5.4.3	設計対象モデラの選択	127
5.5	多重世界管理機構	129
5.6	5 章のまとめ	130
6	CAD システムの設計事例への適用	132
6.1	設計シミュレーション	134

6.1.1	設計シミュレーションに用いる設計対象知識	134
6.1.2	設計シミュレーションの実行例	138
6.2	コピー機の設計への適用	144
6.2.1	コピー機の設計	144
6.2.2	市場の要求の変化に伴う設計変更	160
6.3	システムの考察	162
6.3.1	設計シミュレーションの結果に基づくシステムの考察	162
6.3.2	コピー機の設計事例に基づくシステムの考察	163
6.3.3	本システムの適用範囲に対する考察	166
7	結言	168
7.1	本論文の結論	169
7.2	設計知識操作論に基づく CAD システムの拡張性に関する考察	170
7.2.1	設計者の発想の支援	170
7.2.2	様々な設計方針の取り込み	171
7.2.3	設計知識獲得の枠組	172
7.3	知識集約型工学への展望	173
	謝辞	176
	参考文献	178
	発表論文	184

第 1 章

序言

1.1 本研究の目的

本研究は設計過程において設計者が作り出す情報を、設計知識の操作という観点から考察するものである。そして、設計者の知識操作を支援し、設計者が作り出した情報を蓄えることができる知識集約型工学のための枠組 (Knowledge Intensive Engineering Framework)[Tomiya94]の開発を最終的な目標としている。この知識集約型工学の枠組は、知的 CAD(Intelligent CAD) システムが目指していた設計者が思考することを支援する CAD システムをさらに拡張した枠組である。この枠組では、設計者や製造技術者などの様々な工学分野に携わる人々の知識を計算機上に表現し横断的に利用することにより、様々な分野における作業の支援を行なうことを目標としている。この知識集約型工学の枠組における設計の位置づけを考えるためには、人工物を作り出す過程における設計の役割、設計によって生み出された情報が如何に表現されるかを考察しなければならない。

設計とは人間の創造活動そのものであり、設計者は自分の持っている様々な知識を利用して人工物を創造する。つまり、人間により設計された人工物はその人工物の設計者の知識が集約された結果生み出されたものと考えても良い。また、現在の社会では人工物が町に溢れているために消費者の目も肥え、ただものを作れば良いだけではなく、いかに良いものを作るかという点に設計者の力点も移り変わっている。そのために、現在では産業革命以前の徒弟制度の時代と異なり、一つの人工物を生み出すために、様々な人が各々の分担を専門化することによりより高度な人工物を生み出すための努力をしている。その結果として、現在の人工物には様々な技術が盛り込まれて非常に多彩である。

一方で、この人間を豊にしてくれる人工物の氾濫は一方でゴミや公害といった新たな問題(現代の邪悪)を生み出している[Yoshikawa93]。つまり、人工物を生み出す設計者は消費者のニーズ、リサイクルや公害といった多様かつ複雑に入り組んだ要因を考慮して設計を行なわなければならないようになってきている。また、これらの複雑に入り組んだ要因を考慮しながらより良い人工物を作り出すためには、設計者だけではなく製造技術者や様々な分野の技術者が共通の基盤に立って協調して問題に取り組まなければならない。しかし、製品の高度化には大いに役に立った専門化は、現在の部門を越えた技術者の協調作業を行なう際の障害となっている。そこで、様々な分野の技

術者が緊密に情報を交換することにより、製品の品質向上および設計期間の短縮をはかるコンカレントエンジニアリング ([Fukuda93] など) が提案されている。このコンカレントエンジニアリングでは従来では設計の下流工程であった生産に関する情報や消費者のニーズといったものを適切な設計仕様に落すことにより、上記の目的を果たそうとしている。

このような流れに関連して、設計する製品を特徴付ける製品の品質をいかに設計作業全体に対して保証するかという観点から分析する品質機能展開 [Akao90]、製品の持つ形状情報を含む様々な属性情報をモデル化するプロダクトモデル ([Suzuki91] など) の研究、さらにこのプロダクトモデルを発展させた形で設計製造に関わる全ての情報を計算機上の特定の形式によって表現することによりデータの共有を行ない設計作業や保全作業などの様々な分野の効率化をはかる CALS (Commerce At Light Speed) ([Suematsu95] など) などの研究が行なわれている。

一方、ここでその製品を作る設計者について考えると、様々な部門から様々なデータを得ることができるようになっても、それをどの様に生かせば良いかという知識がなければ、それぞれのデータをうまく運用することができない。例えば、日本の自動車メーカーに対して「開発プロセスはリーンだが、製品設計はむしろゼイ肉が多い傾向がある」 [Fujimoto94] ことが指摘されている。このゼイ肉の例としては、強度的にも2本のボルトで締結できる部分に3本のボルトで締結している場合などがあり、このようなゼイ肉の原因としては以前の設計で生み出された多くの情報を参照せずに以前の設計結果である図面を再利用したことが指摘されている [Fujimoto95]。この例では、ある時点でボルトの数を増やした設計者は、その設計に対する設計仕様を考慮し、強度計算などを行なった結果としてボルトの数を変更したという情報が図面とは別に蓄えられているために、この情報にアクセスしないままに図面だけの情報を再利用し、新しい設計仕様では必要ではないかも知れないボルトをそのまま利用する可能性がある。

同じ専門分野に属する設計者間においても、図面などの表面的な情報のみを用いて情報交換をするとこのような問題が起こるのであるから、専門分野の異なる技術者間で情報を交換する基盤を作成する際には図面などの表面的なデータだけではなく、設計者がどのようなことを考え、どのような知識を利用し、その結果としてどのような決断を

下したのかがわかる形に整理する必要がある。

本研究では、以上のように設計過程において設計者が生み出す情報の価値を認識し、設計過程における知識操作、その結果得られる情報について考察する。そのために本研究では模擬的な設計である設計実験の結果に基づき実際の設計者の行動を分析し、そこで生み出される情報を計算機上に記述する方法を提案する。さらに、人工知能研究の成果を利用することにより、設計者が生み出した情報を補完し、設計者を知的に支援する枠組を提案する。さらに、提案した枠組を例題により検証することにより、本研究の最終目標である知識集約型工学全体のあり方を議論する。

1.2 本論文の構成

設計とは人間の知的作業の一つであり、設計者は様々な知識を利用しながら設計を進めている。この設計という作業は様々な方向から分析され、その分析に応じた計算機による設計支援の方法などが提案されている。

そこで、本章の後半では、今までに行われてきた設計方法論に関する研究および計算機による設計支援に関する研究について概観する。さらに、これらの研究を踏まえた上で、設計者の行なう知識操作という観点から設計過程を分析し、その分析に基づいた計算機による設計者の支援へのアプローチを提案する。

以下に本論文の構成を示す。

第2章「一般設計学とその展開」では、本研究がその基礎をおく設計方法論である一般設計学およびその展開として得られた研究について概観する。まず、2.1項では一般設計学について概観し、2.2項では一般設計学から得られた結果と、模擬的な設計を行なうことにより設計者の行為を認知的に分析する設計実験により得られた結果を統合する Refinement 設計過程モデルについて概観する。

第3章「設計知識操作論」では、設計過程における設計知識の操作という観点から設計過程を分析し、実際の CAD システムに利用可能な形に定式化することを目標とする。まず、3.1項では、実際の設計実験の結果を実体概念の活用という観点から分析することにより、設計過程における実体概念の位相空間の Refinement 過程を分析する。さらに、3.2項ではこの分析に基づいた設計過程モデルを提案する。そして、3.3項では、設計実験の分析を踏まえた設計対象表現手法について議論する。

第4章「設計者の意図の記述」では、第3章で述べた設計者の知識操作の結果作り出された情報を如何に表現するかを議論する。まず4.1項では、設計者の設計対象に対する主観的表現である機能モデリング全般について概観する。さらに、4.2項では、設計者の意図について議論した後に、設計者の意思決定プロセスにおいて用いた情報を記述するために品質機能展開を FBS(Function-Behavior-State) モデリングに応用する方法について述べる。また、4.3項では、3章で述べた機能概念に関する設計知識操作を表現するための FBS モデリングの拡張について議論する。

第5章「設計知識操作論に基づくCADシステム」では3章で述べた設計知識操作論および4章で述べた設計者が作り出した情報の表現の議論を踏まえたCADシステムの構築を行なう。まず、5.1項で全体としてのシステムの構成を述べる。さらに、5.2項では複数の設計対象モデルの統合化に関する研究を概観し、5.3項では既に存在する設計対象モデルを外部モデルとして利用可能な複数の設計対象モデルを統合するプラグブル・メタモデル機構について述べる。さらに、5.4項では、およびこれらのモデルを管理する設計過程管理システムについて述べ、最後に5.5項で、設計過程の履歴を管理する多重世界管理機構について述べる。

第6章「CADシステムの設計事例への適用」では、5章で述べたCADシステムの妥当性を検証する。そのために、6.1項では、実際の設計過程を再現する設計シミュレーションを行なうことにより、設計過程で行なわれる知識操作の表現可能性を検証する。また、6.2項では、コピー機の設計事例を基に複数の設計対象モデルを統合するプラグブル・メタモデル機構の検証および、設計者の意思決定情報の再利用性について検証する。最後に、6.3項では、これらの例題の結果を基に本システムの有効性を検証する。

第7章「結言」では、今までの議論を踏まえて本論文を締めくくり、最後に本研究で提案したCADシステムの拡張性に関する考察および知識集約型工学への展望を述べる。

1.3 設計研究

設計とは人間が製品を作り出すための創造的活動であり、ものを生み出すための学問である工学の一部である。しかし、工学という学問がものの挙動や性質を分析する機械工学、電子工学という様々な分野の学問を生み出す反面、それらの知識をどの様に利用してものを設計するかという点については、統一的な見解が得られているわけではない。そこで本節では、設計に関する研究を設計方法論および計算機による設計支援という2つの観点から概観し、最後に本研究の方法を述べる。

1.3.1 設計方法論

設計方法論と一口にいっても、歯車やポンプに対する設計方法論といった問題領域を特化することにより、設計の手順を定式化しているものから、より一般的な設計全体的手順について述べたものまで様々なレベルのものが存在する。

歯車設計法などの領域を特化した設計方法論は、その領域に特化した設計対象知識を含んだ形で記述されているので、その領域に応じた設計仕様を決めさえすれば、後はその手続きにしたがってさえいけば設計解が得られるような便利な方法である。しかし、設計全体の問題の中における歯車の役割までを踏まえた設計方法論ではない。このようなアプローチは設計解の実現方法が固まった後で、設計解の様々な属性値を決めるような詳細設計などには向いているが、設計解の実現方法自体から考えるような概念設計段階の設計方法論ではない。

これに対し、一般的な設計手順を述べた設計方法論は、設計課題に対する問題分析の方法論や良い設計解とは何かを述べた方法論である。しかし、そこで述べられている手順は先ほどの問題領域を特化した設計方法論に比べ抽象的であり、設計者がその場合場合に依りて、設計対象に関する知識などを利用し解釈することが必要である。

以下では、この一般的な設計手順を述べた設計方法論の代表的なものについて概観する。まず、Rodenacker [Rodenacker70] や Pahl と Beitz [Pahl88] に代表されるドイツ流設計方法論について概観する。このドイツ流設計方法論では設計する対象が持つべき機能を入出力関係で捉え、複雑な機能をサブ機能に分解して機構要素と対応付

け組みあげるといふ設計の方法を示している。また、設計解を評価する項目をチェックシート形で提供しており、良い設計解を得るための基準を示している。また、Roth [Roth82] は機構要素をその入出力関係に基づきカタログ的に整理し、機能と機構要素の対応付けを支援する方法を提案している。

また、Suh[Suh90] は、設計における意思決定を助けうる基礎的な原理を「必要機能の独立性を保て (独立公理)」「情報量を最小化せよ (情報公理)」という2つの公理によって示した。Suhはこの2つの公理を満たすように設計解を選べると各必要機能を各々独立に最適化することができるので、良い設計になると述べている。このSuhの設計方法論は設計解を評価する基準を述べたものである。

一般設計学 [Yoshikawa79] は設計という作業を概念操作という観点から捉えた研究であり、設計を機能概念空間から属性概念空間への写像として定式化している。この一般設計学およびその拡張 [Yoshikawa81a, Tomiyama85c, Tomiyama85b] においては、設計者が持つ知識の性質を位相集合論を用いることにより定式化し、設計という行為を位相空間上の作業として定式化している。また、この一般設計学を基礎とし、機能空間に距離を導入し、その距離を利用することにより設計を支援する研究 [Taura91] や、設計学を実験的に検証する実験設計学 [Yoshikawa81b] に基づいて行なわれた設計実験の結果に基づいた一般設計学の改良である Refinement 設計過程モデル [Tomiyama95] の研究が行なわれている。

これらの設計方法論が製品を生み出す過程の一部である設計という部分の方法論を述べていたのに対し、近年のコンカレントエンジニアリングの研究 ([Fukuda93] など) では、製品を生み出す過程全体における設計の役割が議論されている。例えば、Pugh[Pugh90] は、設計の要素技術である強度解析が良い設計でも、市場を無視して設計された製品では製品として成り立たないことから、製品を生み出す過程全体を見なければならないことを指摘している。そこで、市場のニーズを的確に捉え、実現方法について系統的に検討し、設計グループのメンバー全員が設計全体を見通せるトータルデザインの実現性を述べている。また、赤尾 [Akao90] は同じように市場の要求する品質を設計によって保証するための手法である品質機能展開 (QFD) を提案している。

1.3.2 計算機による設計支援

一方、計算機の進歩も目覚しく、現在では1人の人間がおそらく一生かかってもできない計算をいとも簡単にやっつけてのけるようになっている。この計算機を用いて設計を支援するためのCAD(Computer Aided Design)が実際の設計の現場で利用されるようになってきている。しかし、現状の実際に利用されているCADシステムは形状の表現に力点がおかれており、製品一般に関する情報を扱うことが得意ではない。そこで、形状情報に加え製品の持つ様々な属性情報を形状情報と関係付けてモデル化するプロダクトモデル[Suzuki91]の研究も行なわれている。

また、形状表現だけでなく人工知能研究の成果などを利用して設計における思考過程そのものを支援する研究としては、エキスパートシステムを設計に応用する研究([Nagasawa88]など)や、設計を設計仕様として与えられた制約条件を解くことであると捉え、制約処理の技術を応用する方法などが行なわれている。また、最近では計算機上にうまく定式化して表現できない知識による設計支援を事例ベース推論を用いて行なう方法や([Hattori92], [Nakatani92]など)やGA(Genetic Algorithm)を用いて行なう方法([Yamakawa94], [Oda95])などの研究も行なわれている。

その他にも、設計過程において利用可能な様々なComputer Aided Engineering(CAE)ツールが利用されている。機械設計を例にとれば、熱解析や応力の解析を行なう有限要素解析のシステム・電気回路のシミュレータなど様々な観点から設計対象をモデリングするツールが実際に利用されている。また、これらの複数の計算機ツール間でデータ交換を行なうことは、データ形式の違いなどにより困難であり、様々な技術者が様々な計算機ツールを利用する際の障害となっていた。この問題に対して、各々独立に開発された複数の設計対象モデラにおいて表現されているデータをデータ形式の標準を作ることにより統合化を行なう研究としては、IGES(Initial Graphics Exchange Specification)やSTEP(STandard for the Exchange of Product model data)([Seimitsu93]など)の研究が行なわれている。しかし、これらの方法のほとんどは領域を特化した設計方法論と同様に詳細設計の段階には適用可能であるが、設計解全体を考える段階で有効な方法ではない。

一方、概念設計段階の設計対象表現の手法の研究としては、梅田によるFBS(Function-Behavior-State)モデリング[Umeda92]や、Grabowski[Grabowski95]などの機能モ

デリングの研究や、定性プロセス理論に基づいて設計対象を表現する概念間の関係を管理するメタモデル機構 [Kiryama95] の研究が行なわれている。これらの方法は設計解の詳細が定まっていない段階の設計対象を表現するのには有効であるが、先に述べたような詳細設計の段階を支援する計算機ツールとの統合化が行なわれていない。

また、前項で述べた設計方法論に基づき設計者の思考の過程を計算機上にモデル化する研究も行なわれている。例えば、一般設計学の議論を踏まえたモデルとして、武田 [Takeda91] の計算可能な設計過程モデルがある。このモデルは被験者に模擬的な設計を行ないその過程を観察する設計実験の結果を分析した結果として得られたモデルであり、設計者の思考を設計対象を考える対象レベルと、次に行なう行為を考える行為レベルとに分けて定式化している。しかし、この設計過程モデルでは、設計対象が論理式により表現されており、その表現能力が乏しい。

1.3.3 本研究の方法

1.3.1項で述べた設計方法論は、主に問題の分析手法や設計解を評価する際の基準についてのみ述べており、その実際上の適用については幾つかの例題が示されているだけである。また、どの様な知識をどの様に利用すれば良いかという設計知識の操作という観点からの考察についても、機構のカタログの整理と利用といった幾つかの考察しかない。また、1.3.2項で述べた計算機による設計支援の現状を踏まえ、このような設計方法論を如何に計算機上に表現できる設計知識や設計対象モデルといったものに関連付けるかという考察が必要である。

そこで、本研究では(図1.1)、設計知識の持つ性質について分析を行なっている一般設計学および実験設計学の結果との整合性を考慮した Refinement 設計過程モデルをその基礎として利用し、実験設計学に基づいた設計実験の結果を設計過程における実体概念の役割を設計知識の操作という観点から分析する。さらに、その結果に基づいて新しい計算可能な設計過程モデルを提案する。さらに、設計知識の操作を計算機上で実現するために必要な計算機による設計対象表現について議論する。

次に、設計対象表現についての議論に基づき、設計者が複数の候補補から一つの設計解を選択した意図を記述するための枠組の提案および、複数の設計対象モデルの統

合を行なうための枠組を提案する。設計者の設計解選択の意図を記述するために本研究では、一般設計学に基づいた機能モデリングの手法である FBS モデリングの手法に市場の要求を表現することができる品質機能展開手法を応用することにより実現する。また、複数の設計対象モデルを統合するために、複数の設計対象モデルに表現される概念間の関係を管理するメタモデル機構をその基礎として利用する。実際に複数の設計支援システムを利用するためには、そのシステムを適用する領域に応じた問題の定式化をしなければならず、そのためにはデータの統合化だけではなく、様々なシステムに応じた問題の定式化ができるように計算機が支援する必要がある。そこで、設計者が設計対象をモデル化する過程を分析し、そのモデル化の際に行なう仮定を取り扱う枠組を提案する。

最後に、先に分析した設計知識の操作という観点から分析した結果および設計対象表現に関する枠組を計算機上に CAD システムとして構築する。さらに、設計実験の結果を利用した設計シミュレーションおよびコピー機の設計を例題とし、CAD システムの有効性を検証する。

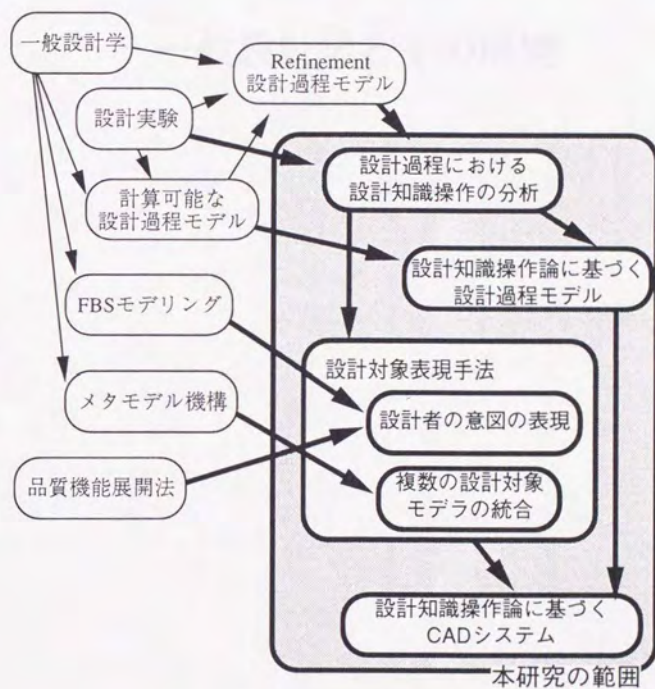


図 1.1: 研究の方法

第 2 章

一般設計学とその展開

本章では、3章で行なう設計過程における設計知識の操作の分析の基礎となる一般設計学およびその展開について概観する。まず最初に設計を位相集合論を用いて公理的に定式化した一般設計学、さらに一般設計学から得られた結果と設計実験により得られた結果を統合する Refinement 設計過程モデルについて概観する。

2.1 一般設計学

一般設計学 [Yoshikawa79, Yoshikawa81a, Tomiyama85c, Tomiyama85b] とは、人間の持っている概念が、実体概念と人間が実体を分類して考える基準である抽象概念の2種類から成立していることを前提に、設計という作業を位相集合論を用いて公理的にモデル化したものである。本節では、一般設計学における3つの公理と後の議論で必要になる定理についてのみ取り扱う。

2.1.1 公理系

一般設計学は、3つの人間がものを認識する方法に関する公理の上に構築されている。

公理1 (認識公理) 実体は属性 (あるいは機能、形態などの抽象概念) によって認識あるいは記述することが可能である。

公理2 (存在物と概念との対応公理) 実体集合と (理想的な) 実体概念集合は1対1対応する。

公理3 (概念に関する公理または概念の操作公理) 抽象概念集合は実体概念集合の位相である。

一般設計学において実体とは人間がものを認識する単位であり、実体概念集合とは、実体を思い浮かべることによって得られるイメージのようなものである。公理1は、設計者による実体の認識が、意味ないし価値に導かれて実体概念を分類した類である抽象概念を用いて行なわれることを示している。

また、実体集合とはこの世に存在するあるいは存在する可能性のある全ての実体の集合であるが、設計者にとってこのような実体の全てを知ることは事実上不可能であり、全ての実体に対して実体概念を対応づけることは不可能である。しかし、一般設計学では、個人の知識が極限まで増加した状態としてこのような集合を考え、理想的な実体概念集合と呼ぶ。また、公理2により実体概念に関する操作が現実世界の実体に関する実体に対応付けられることが保証される。

また、公理3では抽象概念集合が位相であることすなわち、形式的には、実体概念集合 S 、抽象概念集合 T として次のように表現される。

1. $\phi \in T, S \in T$
2. $\bigcap_{\lambda \in \Lambda} T_\lambda \in T (\Lambda \text{ は無限可算})$
3. $\bigcup_{\lambda \in \Lambda} T_\lambda \in T (\Lambda \text{ は有限})$

一般設計学では、実体概念を分類する抽象概念として、実体が持っている様々な物理的性質、化学的性質などの項目とその性質を示す値の組み合わせで表現される属性概念、属性概念のうち特に形態に注目したものである形態概念などの客観的な概念と特に実体の持つ機能的価値に注目する時に成立する機能概念を考える。

以下では、実体概念集合を S 、抽象概念集合を T 、属性概念集合を T_0 、機能概念集合を T_1 、形態概念集合を T_2 で表す。

2.1.2 理想的知識

理想的な設計者による設計を議論するために、一般設計学では、理想的知識を「実体集合の全ての元を知っており、かつ各元を抽象概念で厳密に表現可能な知識」と定義している。この定義は、理想的知識によって実体が抽象概念によって区別可能であることを示している。位相論を用いて形式的に記述すると、実体概念集合の任意の2つの要素 s_1, s_2 に対して、 $T_1 \cap T_2 = \phi$ を満たす s_1 を含む抽象概念である T_1 と、 s_2 を含む抽象概念である T_2 を抽象概念集合から設定することができることを意味している。このことは理想的知識が位相論というハウスドルフ空間の性質を持つことを意味している。

定理1 理想的知識はハウスドルフ空間である。

次に、設計仕様を「設計解としての機械が持つべき性質を抽象概念によって指定したもの」と定義し、その中でも特に T_1 の元によって表現された設計仕様を機能的仕

様と定義した。この時、公理3により仕様は

$$T = \bigcap_{\lambda \in \Lambda} T_{\lambda}$$

の形で表すことができ、以下の定理が導かれる。

定理2 要求としての設計仕様は、抽象概念集合の適当な元の積で表すことができる。

この時、 T に属する実体概念が存在するかについて考察すると、 T_{λ} の選び方によって次の3つの場合があり得る。

1. $T = s_1$: 理想的な仕様
2. $T = s_1, s_2, \dots$: あいまいな仕様
3. $T = \phi$: 矛盾する仕様

また、このように設計仕様を捉えると次の定理が導かれる。

定理3 (矛盾していない) 設計仕様とはフィルタである。

次に設計解を「仕様 T に含まれかつ製造に必要な全情報を持っている実体概念 s 」であると定義した。しかし、現実には有限の操作で属性空間上で設計解である実体概念に収束できないので、設計解である実体概念を特定することができない。そこで、製造法に関する知識を、実体の持つ属性の情報から製造に必要な全情報が得られる知識と仮定する。この仮定から次の定理が得られる。

定理4 属性空間における実体概念は設計解である。

定理5 設計解は属性概念集合から適当に選んだ元の積によって与えられる。

これらの定理から、仕様があいまいな場合においても、属性の情報に対応付けられた製造法が選択されることにより実体を製造することができる。この時、製造される実

体は設計仕様として与えられた属性を満たしているので、あいまいな仕様の中に属しており、近似的に収束した解と呼べる。

ここまでの議論を踏まえ、一般設計学では、設計を「抽象概念空間上に示された領域に対応する属性(概念)空間上の領域を指定すること」と定義している。この定義から直ちに次の定理が導かれる。

定理 6 理想的知識(ハウスドルフ空間)での設計は仕様を記述した時に完了する。

この定理は、理想的な設計を、フィルタである設計仕様を記述していくことにより設計仕様を満たす実体概念を一意に収束させ、その仕様に対応する実体概念を介して設計解を属性概念集合の積として表現することと捉えたものである。

しかし、現実の設計ではこの収束点である実体概念がないことがほとんどである。また、もっとも困難で純粋な設計が機能空間上で与えられた仕様から解を求めることと考え、このような設計問題に対し、設計とは「機能空間の点を属性空間の点へ移す写像である」と定義した(図 2.1)。

この時、設計可能である条件は、機能空間上で定められた設計仕様を写像した結果として得られる属性空間上の領域に属する点が必ず設計仕様を満たすことである。言い替えると、仕様として与えられた機能空間上の領域の部分集合として属性空間上の属性概念を選択できることである。数学的には、属性空間から機能空間への写像 f について、機能空間における像 $T_{11} = f(T_{01})$ が開集合であれば属性空間上の T_{01} が開集合であることを意味しており、これは関数 f が連続写像であること、および、機能空間の位相が属性空間の位相より弱いことを示している。このことは次の定理としてまとめられる。

定理 7 設計が可能ならば、属性空間 (S, T_0) から機能空間 (S, T_1) への恒等写像が連続となる。

ここで、位相の関係を整理すると、

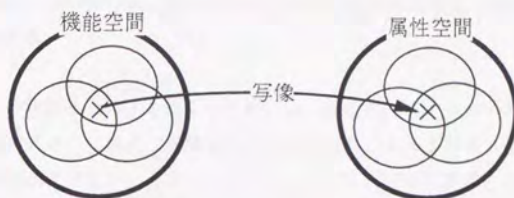


図 2.1: 理想的知識による設計

定理 8 実体概念集合 S に位相を導入して、抽象概念空間 (S, T) 、属性空間 (S, T_0) 、機能空間 (S, T_1) 、形態空間 (S, T_2) などを作ったが、これらの間の強弱関係は

$$T \supset T_0 \supset T_2, \quad T \supset T_1$$

である。また、設計可能である場合には、

$$T_0 \supset T_1$$

である。

2.1.3 現実的知識

前項で述べた理想的知識における設計では、設計に関する知識の極限状態であるこの世に存在するあるいは存在する可能性のある全ての実体に関する知識を持っている設計者について設計をモデル化したものである。しかし、記憶量、思考速度の有限性などの問題から、前項で述べたこのような知識を持った設計者の仮定は現実的ではない。そこで、このような設計者が持っている理想的知識に不完全性を導入した知識を(広義の)現実的知識と定義した。

この(広義の)現実的知識においては、前項で述べたような写像としての設計が不可能である。そこでこのような知識において設計を可能にするための条件が次の定理として示されている [Yoshikawa81a]。

定理 9 現実的知識では、機能概念集合系の元と、属性概念集合系の元との間に、実

体概念を媒介としない何らかの直接的な対応が見い出されるとき、またその時に限り設計が可能である。

しかし、この設計をそのまま行なうためには、両位相に属する全ての抽象概念間の対応関係が論理式ないし数式で表現された既知の関数により表現されていることが必要であり、現実的ではない。そこで、定理9のもとで設計を可能にするためのモデルとして次の4つを提案している。

1. 対応型

(a) 全数対応モデル

仕様と解の対応関係があらかじめわかっているようなカタログが存在する場合に検索により解を得るモデル

(b) 計算モデル

機能で与えられる仕様が属性の関数として得られる時に、各々の関数によって得られる連立方程式を解くことにより設計解を得るモデル

(c) 生成モデル

機能表現に何らかの生成規則を用いることにより中間表現に変換し、その結果として属性表現である設計解を得るモデル

2. 収束型

(a) 範例モデル

設計仕様が部分的に満たす実体の構成要素をこれまでに知っている実体の別の要素と交換していくことにより設計解を得るモデル

しかし、この(広義の)現実的知識における不完全性とは前項で述べた3つの公理が成立しないことを意味している。しかし、3公理の成立を認めない場合には、設計を数学的に厳密に議論することができないため、(狭義の)現実的知識による設計のモデル化では、実体概念集合の範囲を限定することにより3公理の成立を認めている。さらに、この(広義の)現実的知識における設計では、設計の結果として得られた設計解の物理的な拘束条件が考慮に入れられていないために、実際には実現不可能な設計解

(永久機関など)を設計する場合がある。そこで、(狭義の)現実的知識では、このような物理的な拘束条件を考慮している。

このような物理的な拘束条件を考慮するために、(狭義の)現実的知識に基づく一般設計学では、物理的な拘束条件の定式化である物理法則を「物理量」を未定義語として、「ある場における実体にかかわる物理量間の関係を記述したもの」と定義している。さらに、設計者が持つ物理法則に関する概念を、「場」を未定義語として、「抽象概念の一つであり、特にある実体がある場に置かれた時に物理法則の発現としての物理現象に注目して成立する」と定義している。また、物理法則概念位相 T_p を考え、物理法則に反しない実体概念集合 \tilde{S} (ただし、 $S \in T_p$ かつ $\tilde{S} \subset S$) を取り、 \tilde{S} を実現可能な実体概念集合と呼ぶ。

この時、物理法則は属性に関する式 $P_j(a_1, a_2, \dots, a_N) = 0$ (ただし、 a_i は属性概念) として表現できるので次の定理が導かれる。

定理 10 実現可能な実体概念集合 \tilde{S} において、物理法則概念位相 T_p は属性概念位相 T_0 の部分基である。

この時、全ての実現可能な実体については有限個の物理法則により説明可能であり、それだけの物理的制約を受けると仮定する。これは数学的には(実現可能な)実体概念集合がコンパクトであることを意味している。一般設計学では、この既知の物理法則についてコンパクト化された(実現可能な)実体概念集合を(狭義の)現実的知識と定義し、この現実的知識の性質として次の定理が導かれる。

定理 11 実現可能な実体概念集合 \tilde{S} は属性概念位相 T_0 についてコンパクト・ハウスドルフ空間である。

定理 12 現実的知識 (\tilde{S}, T_0) で評価関数

$$f: \tilde{S} \rightarrow R(R: \text{実数体})$$

が存在し連続ならば、この関数 f は最大値と最小値を持つ。

また、この設計知識に基づいて設計解を1点に収束させる方法が次の定理によって示される。

定理 13 現実的知識において、設計仕様から有向点列が得られるならば、設計解は高々1点に収束する。

つまり、(狭義の)現実的知識における設計とは、定理13に述べられたように設計仕様を用いて実体概念間に何らかの順序を導入し、設計解を収束させることにより意味のある設計解を得る過程として捉えられた。

次に、この定理13に基づいた現実的知識を用いた設計解の収束過程を記述するにあたりメタモデルという概念を導入した。このメタモデルとは「属性概念の集合」として定義され、メタモデル集合は「全てのメタモデルの集合」と定義された。このメタモデルを用いて定理13で述べた収束政策を満たす設計を行なうことを次の定理として示した。

定理 14 メタモデルを進化させると、極限としての実体を定めることが出来る。

この定理は、極限をとっているために必ずしもメタモデルの進化として実体概念を一つだけ得られるということを保証していないが、物理的拘束条件を満たした近似解を得ることが出来ることを示している。さらに、この定理は設計が段階的に進んでいくことを示している(図2.2)。

つぎに、メタモデルを用いた設計を行なうために必要なメタモデルの決定法について考えるにあたり、設計仕様を記述するための抽象概念である機能を「実体がある場においた時、その場を支配する物理法則によって引き起こされる物理現象」と定義しなおした。この時、メタモデルとして $M = \bigcap_{\lambda \in \Lambda} M_{\lambda}, \forall M_{\lambda} \in T_p$ となる機能素を選ぶことにより設計が可能であることを次の定理で示した。

定理 15 メタモデルとして機能素を選ぶ時、設計仕様をメタモデルで表現することができ、このメタモデルの元として設計解を含む。

また、現実的知識の有限性を考慮すると、設計解が実体化された際にその仕様にある場に置かれたにも関わらず、仕様と異なる挙動を示す可能性がある。一般設計学では、この仕様と異なる挙動により発現される機能を予期せぬ機能と呼ぶ。この時、現実的知識に基づいた設計解は次の定理を満たす。

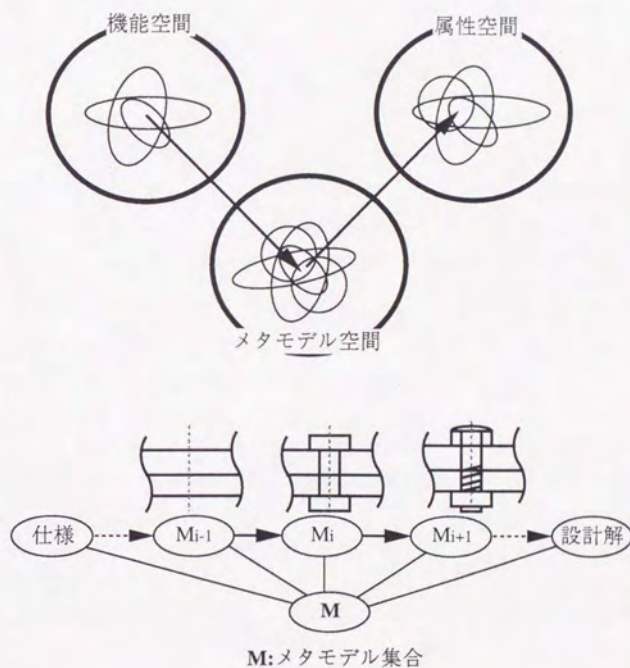


図 2.2: メタモデルを用いた設計 [Tomiya85b]

定理 16 現実的知識に置いて有限性を考慮すると、設計解は予期せぬ機能を持つ。

2.2 Refinement 設計過程モデル

本節では、一般設計学の拡張である Refinement 設計過程モデル [Tomiya95] について概観する。Refinement 設計過程モデルでは、一般設計学を実験的に検証する実験設計学 [Yoshikawa81b] に基づいて行なわれた設計実験の結果との整合性をとるために提唱されたものである。そこで、本節では実験設計学の結果である設計実験の結果について概観した後に、Refinement 設計過程モデルについて概観する。

2.2.1 設計実験

ここでは、武田ら [Takeda91] によって行なわれた実験設計学に基づく設計実験による設計過程の分析結果について述べる。設計実験とは、設計者にある特定の設計課題を与えて模擬的に設計を行なってもらい、その過程により得られた発話や図 (プロトコルと呼ぶ) を観察することである。

認知的設計過程モデル

設計実験から得られたプロトコルを一つの決定がなされるまでの過程に注目して解析した結果、設計過程における一つの問題解決の手順には次の五つの段階があることが解った [Takeda91]。

1. 問題提起

解決すべき問題の発見・指摘。

2. 提案

問題提起に対し、解決候補を出す段階。

3. 展開

提案した解候補を設計者が有している知識をもとに具体化。この途上で問題点が生ずると、これを新たな問題提起とする。

4. 評価

展開した各解候補をある評価基準で評価。

5. 決定

評価をもとにどれを採用するか決定。

設計過程においては、様々な問題解決が行なわれるので、この問題解決の手順が繰り返されることになる。この設計実験の分析により得られた問題解決の手順としての設計過程モデルを設計サイクルと呼ぶ。

設計実験による設計知識の分析

次にこの設計実験により得られたプロトコルから、設計過程において用いられた知識のほとんどが以下の6つの概念間の関係によって分類できることを示した[Takeda91]。

1. 実体

現実世界に存在しているもので設計対象あるいは設計対象の構成要素になりうるもの。

2. 機能

注目している実体が他の実体との関係において持つ役割の概念

3. 属性

注目している実体自体の、形状、寸法といった性質

4. 位相関係

実体と実体とが位相的にどの様に接続しているかを示す関係

5. 接続方法

実体と実体との位相関係を実現する方法

6. 製作方法

実体をどの様に製作するかと言う方法

また、実際に用いられていた知識は、以下の9種類であった。

知識分類	問題提起	提案	展開	評価	計
機能→実体		30			30
実体→機能	5	1	1	1	8
属性→実体		1			1
実体→属性	7	15		16	38
属性→属性		1	3		4
位相関係→接続方法		24			24
実体→製造方法		1	2	6	9
製造方法→属性		5	2	10	17

表 2.1: 設計サイクルの各段階で利用された設計知識の分類 [Takeda91]

計算可能な設計過程モデル

また、表 2.1 の分類から設計サイクルの各段階で利用される知識の利用法には一定の傾向があることに注目し、計算可能な設計過程モデルが作成されている [Takeda91, Yoshioka91]。

設計を設計対象に対する操作に注目して分析すると、設計は要求仕様を満たすような設計対象をアブダクション (abduction) [Inoue92] により見い出す行為として定式化できる。アブダクションとは、Peirce により提案された推論方式の一種で、演繹、帰納と共に、論証の三様式をなしている。その定義は「結論を導くような予測を導く論証」である。

しかし、実際には設計サイクルで述べられているように、設計は段階的に進んでいく。よって、この設計対象が段階的に詳細化していく過程、すなわち設計サイクルの1サイクルによって設計対象が詳細化される過程を、アブダクションと演繹の繰り返しによって設計対象を詳細化していく過程として定式化する。すなわち、この1段階では、アブダクションを行なうことにより、より詳細な設計対象の仮説を提案し、その仮説から設計対象知識を用いて演繹を行なうことにより、その提案された設計対象の持つ性質を導出する。

また、設計過程において初めは正しいと思っていた知識が、他の知識を考慮に入れることによって正しくなかったと気づくことがある。この知識の矛盾は、最初に考えた知識が不完全であったために起こる。すなわち、一方の知識についてその適用範囲に関する条件が不足しているために、条件の不足した知識が本来の適用範囲以外に使われ、見かけ上の矛盾が起こったと考える。よって、この条件の不足した知識の適用範囲の条件を求め、知識の条件部に加え、完全性を高めることによりこの見かけ上の矛盾は解消できる。この条件はサーカムスクリプション (circumscription) [McCarthy80] によって求めることができる。サーカムスクリプションとは、「与えられたこと以外は考慮しない」人間の思考の形式化として提案された常識推論の一種である。

また、設計に全ての必要な知識を始めから予想することは不可能であり、設計を進めていくことによって必要な知識が判明し、それらの知識が順次考慮に入れられ、用いられると考えられる。この様な知識の変化をメタレベルの推論により実現する。

これらの要件を満たす設計過程モデルを、設計対象を表現するレベルである対象レベルと、その対象レベルでの操作を決定する設計者の思考を表現するメタレベルである行為レベルの2つのレベルに分けてモデル化した。

この対象レベルにおける操作として、先ほど述べたアブダクション、演繹、サーカムスクリプションの3つの推論を用いる。また、知識の変化や対象レベルの3つの推論は行為レベルの推論によって制御される (図2.3)。

設計サイクルをこの設計過程モデルで解釈すると、「提案」はアブダクションとして解釈され、「展開」「評価」は演繹として解釈される。また、「展開」「評価」段階において知識の不完全性により問題が見つかり、それを新たに問題提起とする過程は、サーカムスクリプションとして解釈される。

また、この設計過程モデルでは設計対象が段階的に進化していく様子を、多重世界によって記述する。設計サイクルが一回終り設計対象が詳細化した結果、その記述が増えると、そのサイクルが始まる直前の世界の子供の世界として新しい世界を作る。また、設計のやり直しは、以前の世界に戻ることによって表現される。

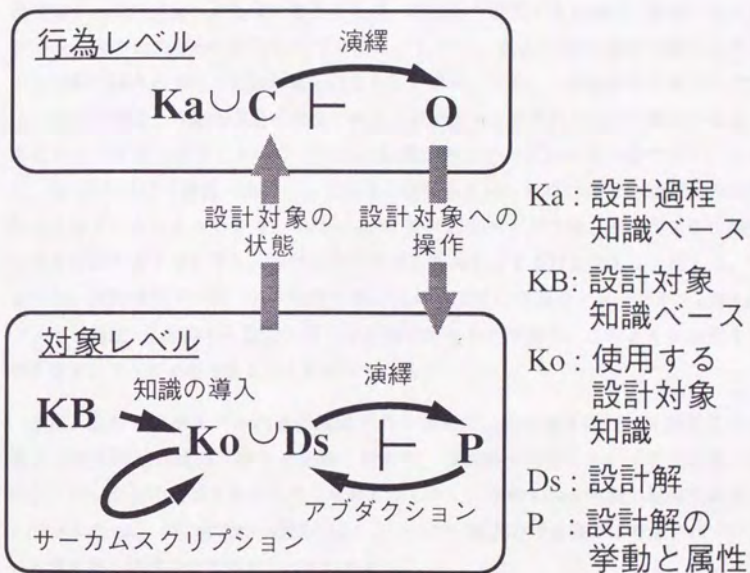


図 2.3: 計算可能な設計過程モデル

2.2.2 一般設計学と設計実験の整合性

前項で述べた設計実験の結果は一般設計学の一部を支持している。例えば、設計解が段階的に詳細化されるとモデル化した認知的設計過程モデルはメタモデルの進化モデルの詳細化のメカニズムと考えられる。

しかし、必ずしも設計実験の結果と一般設計学は整合的ではない。もし、設計が機能空間から属性空間への写像であるならば、設計者が利用する知識は「機能→属性」といった形の知識が中心になるはずである。しかし、表2.1に示す設計実験の結果の中に実際にはそのような知識が見い出されていない。また、一般設計学のモデル化では、設計は機能から属性空間の写像と考えられており、そのためには「機能→実体」あるいは「実体→属性」という方向の知識が利用されていれば十分である。しかし、表2.1からは「機能→実体」、「実体→機能」といった様に設計知識が両方向に利用されていることがわかる。Refinement 設計過程モデルでは、その理由が仕様の不完全性に起因すると考え、設計を設計仕様を明らかにする行為であると捉えた。すなわち、設計過程では隠された設計仕様の発見や設計仕様間のトレードオフ(例えばコストと性能)に起因する設計仕様の変更等が行なわれており、このような過程をモデル化することが必要であることを述べている。

また、設計がメタモデルの進化過程であるならば、設計過程において設計者が利用する知識は先の機能に関する知識に加えて、「機能→物理現象」「物理現象→属性」といった形の知識であると考えられる。しかし、実際の設計実験の結果である表2.1においては、「位相関係→接続方法」といった一般設計学知識では考慮されていない知識も多く利用されていることがわかる。

また、実際の設計では設計仕様が一般設計学が仮定しているように全て機能概念で与えられることはなく、機能的仕様、物理法則的仕様(エネルギー源に関する仕様など)、属性的仕様(大きさに関する仕様)などの組み合わせとして設計仕様が与えられることが多いことを指摘している。

以上に述べた一般設計学と設計実験の不整合を解消するために一般設計学の現実的知識に基づく設計モデルを基に設計実験の結果として判明したことを盛り込んだ Refinement 設計過程モデルが提案されている。この Refinement 設計過程モデルでは、

設計を機能的設計仕様から始まる写像と考えるのではなく、機能、物理現象、属性に関して与えられた不完全である要求を基に、機能位相空間、メタモデル空間、属性位相空間を同時に Refinement することにより設計仕様を明らかにしていく過程としてモデル化した(図2.4)。



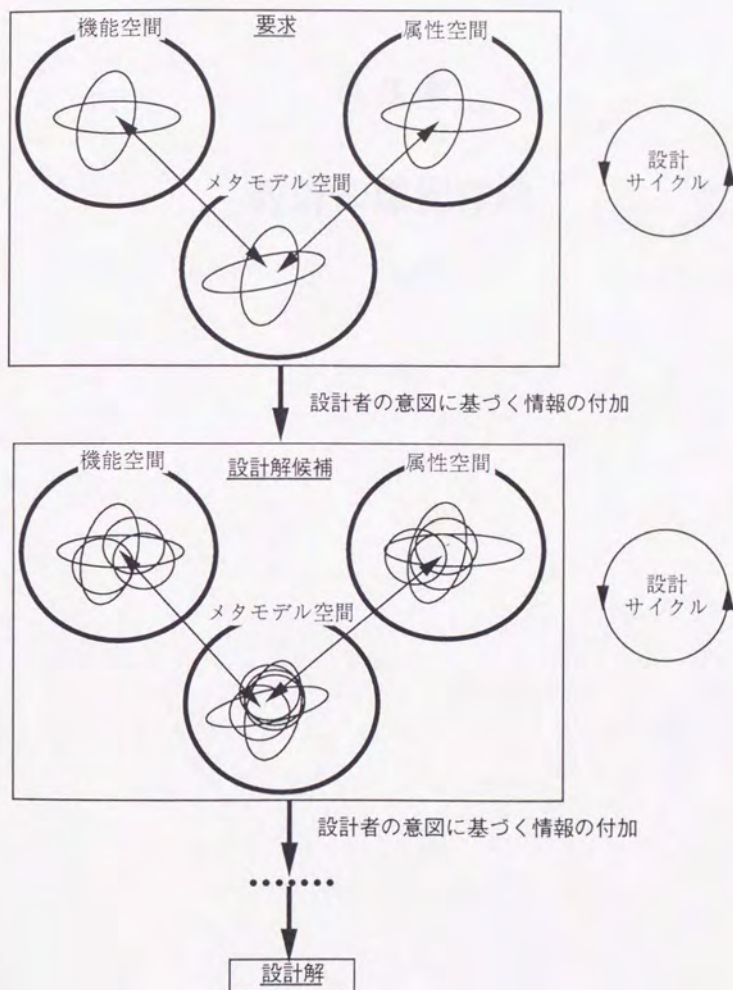


図 2.4: Refinement 設計過程モデル

第 3 章

設計知識操作論

本章では、前章で述べた Refinement 設計過程モデルにおいて提案された設計仕様を明らかにする位相空間の Refinement 過程を設計知識の操作という観点から分析する。そのために、実際の設計実験の結果を実体概念の活用という観点から分析し、位相空間への操作として設計知識操作を定式化する。

また、この分析に基づいた操作を計算機上で行うために必要な設計対象の表現手法について議論する。さらに、設計対象を計算機上における表現へとモデル化する過程について分析し、実際の CAD システムにおいて Refinement 過程を実現する方法を提案する。

3.1 設計実験の結果に基づく設計知識操作の定式化

本節では、一般設計学の拡張である Refinement 設計過程モデルの議論を基礎として、設計実験の結果を分析することにより設計者が行う位相の Refinement 過程を設計知識の操作として定式化する。また、2.2.1節に述べた計算可能な設計過程モデルの議論にもあるように、設計者は設計の進行にともない必要な知識を導入し利用していると考えられる。そこで、本研究では、この位相の Refinement 過程を、設計者の持っている設計知識と考えられる実現可能な実体概念集合を台集合とする位相空間に対する操作ではなく、設計者の思考のためのワークスペースである設計者が考えている実体概念集合を台集合とした位相空間に対する操作と考え、これらの操作と設計知識との関係を分析する(図 3.1)。

3.1.1 設計過程における実体概念

設計者は設計過程の中で様々な実体概念を参照し、分析することにより設計を進めている。また、参照される実体概念も設計過程の進行に伴い詳細化されている。ここでは実体概念の詳細化過程に注目し、設計過程における実体概念の役割を分析する。

設計者は、設計の初期の段階では実体概念をその必要な部分のみを見て理想化していると考えられる。例えば、次のような体重計の設計を課題とした設計実験 [Takeda91] の初期段階における設計プロトコル(図 3.2)では、実際の体重計の構造を考え、体重計の持つ機能(重力を変位に変換する)を代表するバネという実体概念によって問題提起をしている。

発話1で問題提起として述べられた「バネ」という実体概念は、発話3,4により別の実体概念(スプリング・バネ、板バネ)へと詳細化されている。このように実体概念が詳細化されていることから、発話1で用いられた「バネ」という実体概念は、一般設計学で定義したような特定の实体に対応して設計者が作り出したイメージではないと考えることができる。そこで、この設計者が利用している実体概念について考察してみる。

一般設計学によると、実体を認識あるいは記述するためには属性などの抽象概念が

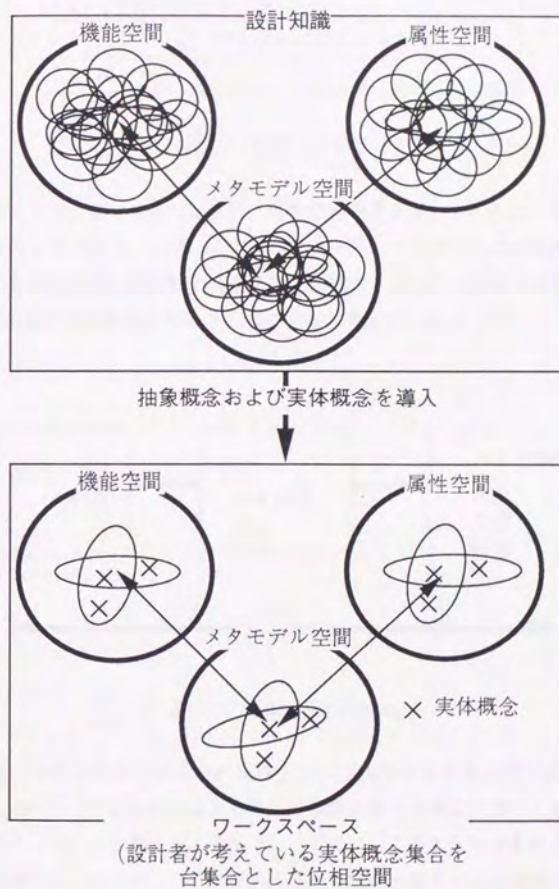


図 3.1: 設計者の思考のためのワークスペースと設計知識

1	まず、これはバネを選択しなくてはならない。
2	これはかなりのバネだ。
3	スプリング・バネ以外に使えるものは
4	板バネ

図 3.2: 体重計の設計に関するプロトコルデータ (部分)

利用されることが必要であり (公理 1)、属性記述の量を増やすことにより実体が正確に記述できるようになる。一方、このプロトコルにおける実体概念の詳細化では、実体概念をより詳細に記述するために形状という属性を考え、その属性概念を付加することにより詳細な実体概念を得ようとしていると考えられる。

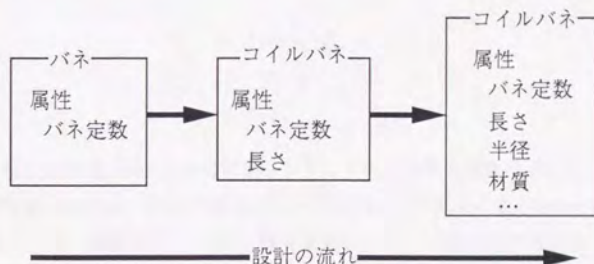


図 3.3: 実体概念の詳細化

すなわち、設計者は属性記述の詳細度に応じた実体概念を持っていると考えられる。また、このような実体概念はある特定の属性を持つ実際に存在する実体群の総称として利用されていると考える。そこで、以下では、このような実体概念を抽象的な実体概念と呼び、これに対し一般設計学において定義されていた実体概念をイメージとしての実体概念と呼ぶ。

形式的には、抽象的な実体概念を s_a とすると、

$$s_a \notin \tilde{S}$$

$$\begin{aligned}
 s_a &\in \tilde{S}' \\
 s_a &\in \bigcap_{T \in T_a^0} T \\
 T_a^0 &\subset T_0
 \end{aligned}$$

ここで、 \tilde{S}' は設計者の思考のためのワークスペースにおける実体概念全体の集合であり、 T_0 は属性概念集合、 T_a^0 は抽象的な実体概念に対して与えられる属性概念の集合である。すなわち、抽象的な実体概念は、設計者の思考を円滑に行なうために考え出された現実には存在していない理想的な実体概念であり、その性質として有限の属性概念を持つ。

また、この抽象的な実体概念 s_a について、抽象的な実体概念が持つ属性概念集合 T_0 に含まれる全ての属性を持つ実体概念集合 S_{ac} を、抽象的な実体概念に対応する実体概念集合と呼ぶ。

$$\begin{aligned}
 T_a^0 &= \{T | T \in T_0, (s_a \in T)\} \\
 S_{ac} &= \bigcap_{T \in T_a^0} T
 \end{aligned}$$

以降では、設計者が持っているイメージとしての実体概念全体の集合に、抽象的な実体概念全体の集合 S_a を加えた集合 ($S_k = \tilde{S} \cup S_a$) とその上に考えられる位相 (抽象概念空間 (S_k, T)、属性空間 (S_k, T_0)、機能空間 (S_k, T_1)、形態空間 (S_k, T_2)、物理法則空間 (S_k, T_p)) を設計者が持つ知識とする。

ここで、設計者が考えている属性概念集合からなるワークスペースとしての属性概念空間を考える。この時、先に述べた設計過程における実体概念の詳細化過程は、新たな属性概念を導入することにより属性概念空間の位相を強め、以前の代表元に変わり新たな代表元もしくはイメージとしての実体概念を導入する過程であると定式化できる (図 3.4)。

この実体概念の詳細化の過程を次の位相空間への操作として定式化する。

設計知識操作 1 実体概念の詳細化 (属性概念位相空間の Refinement)

1. ある段階において、設計者の思考のワークスペースに存在する実体概念集合 \tilde{S}'_n

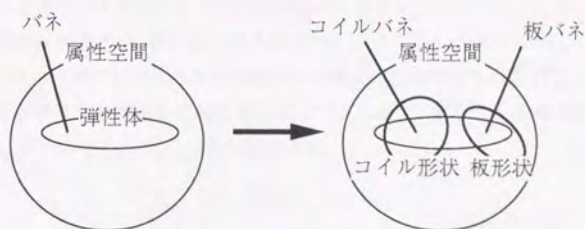


図 3.4: 抽象的な実体概念

の元である抽象的な実体概念 s_{an} を選択する。

$$s_{an} \in \tilde{S}'_n$$

$$s_{an} \notin \tilde{S}$$

2. この抽象的な実体概念が持つ属性概念集合 T_n^o を基に、抽象的な実体概念に対応する実体概念集合の部分集合である S_{anc} を検索する。

$$T_a^o = \{T | T \in T_o, (s_{an} \in T)\}$$

$$S_{anc} \subset \bigcap_{T \in T_a^o} T$$

3. 検索された実体概念集合から、具体化の結果として得られる抽象的な実体概念もしくはイメージとしての実体概念の集合 S_n を選択する。また、属性空間 (S_k, T_o) に関する知識を利用することにより、選択された実体概念集合に関連する全ての属性概念集合 (T_{n+1}^o) を得る。

$$S_n \subset S_{anc}$$

$$T_{n+1}^o = \{T | T \in T_o, \exists s \in S_n (s \in T)\}$$

4. さらに、新しく得られた実体概念集合をワークスペースの台集合に加え、新しい台集合 \tilde{S}'_{n+1} とする。また、設計知識である抽象概念集合 T に含まれる抽象

概念 T をワークスペースにおける抽象概念集合 T'_n に含まれる T'_n に 1 対 1 で対応付ける写像 f_n を考える。ここで、新たに得られた台集合に対し、ワークスペースの台集合に含まれる実体概念から構成される部分集合系 (T'_{n+1}) を求めることにより、属性概念位相空間 $((\tilde{S}'_n, T'_n) \rightarrow (\tilde{S}'_{n+1}, T'_{n+1}))$ 、機能概念位相空間 $((\tilde{S}'_n, T'_n) \rightarrow (\tilde{S}'_{n+1}, T'_{n+1}))$ を詳細化する。

$$\begin{aligned}\tilde{S}'_{n+1} &= \tilde{S}'_n \cup S_n \\ T'_{n+1} &= f_{n+1}(f_n^{-1}(T'_n)) \cup f_{n+1}(T'_{n+1}) \\ T'_{n+1} &= f_{n+1}(f_n^{-1}(T'_n))\end{aligned}$$

5. また、新たに得られた各々の実体概念 $S_n = s_{n1}, s_{n2}, \dots, s_{nN}$ が持つ属性概念を用いてメタモデル M'_{nj} を $M_{n+11}, M_{n+12}, \dots, M_{n+1N}$ に進化させ、メタモデル位相空間 $((\tilde{S}'_n, M'_n) \rightarrow (\tilde{S}'_{n+1}, M'_{n+1}))$ を詳細化する。

$$\begin{aligned}M'_n &\in (M'_n) \\ M'_{n+1i} &= M'_n \cap \{T' | T \in T_o, s_i \in T, T' = f_n(T)\} \\ M'_{n+1} &= f_{n+1}(f_n^{-1}(M'_n))\end{aligned}$$

また、設計の初期の段階では考えられているこれらの抽象的な実体概念は、複数の実体概念を代表する代表元であるのために、設計解として抽象的な実体概念を選択した段階では、設計解を一つに絞り込めてないことになる。そこで、最終的に設計解として得られる元は抽象的な実体概念からイメージとしての実体概念に置き換えられていなければならない。このことは、設計解が抽象的な実体概念で表現されている段階において考慮されている属性概念だけでは、最終的に設計解として得られる元を含む設計者が考慮する実体概念集合において分離公理が満たされていないことを意味している。逆にいうと、特定のイメージとしての実体概念で表現される設計解を得るためには、属性概念空間を分離公理を満たすまで強めることが必要である。

このことを図 3.2 の発話を例にとり説明すると、発話 1 の段階では弾性体という属性概念にのみ注目しており、この時点では板バネとコイルバネはワークスペースとしての属性概念空間では分離されておらず、ワークスペースとしての属性概念空間は分離公理を満たしていない。同様に、板バネやコイルバネについて詳細化を進めていくと、この時点での属性概念空間は分離公理を満たしていない。

ここで、単純に設計仕様を満たす一つの設計解を得ようとする場合を考えると、一般設計学のように設計解と関係のない実体概念についてまでも Hausdorff の分離公理を満たすように詳細化する必然性はない。すなわち、属性空間の位相を相異なる2つの設計解を分離する基準が存在するまでに位相を強めれば良い。つまり、設計仕様を満たす設計解を得る行為は次の定理として定式化できる。

定理 17 設計仕様を満たす設計解を得る行為とは、属性空間の位相を Kolmogorov の公理により分離できるまで強めることである。

証明 位相空間上の設計解に対応する点とその点と相異なる点について、設計解の近傍で他の一方の点を含まないものが存在することである。すなわち、これは Kolmogorov の公理、相異なる2点 x, y に対して、少なくとも一方たとえば x の近傍で、他の一方すなわち y を含まないものが存在することを満たすことである。(証明終り)

また、表2.1の「位相関係→接続方法」に関する知識もこの抽象的な実体概念に関する議論と同様に考えることが出来る。すなわち、位相関係という属性により得られる実体概念は複数存在し、イメージとしての実体概念を1つに絞り込むことができないために、接続方法というより詳細な属性概念に詳細化していると考えられる。

3.1.2 実体概念を媒介とする設計仕様の明確化

Refinement 設計過程モデルで述べられているように、設計の初期の段階では一般設計学が仮定していたような理想的な設計仕様が与えられていないと考えられる。この事は次の定理として示される。

定理 18 現実的知識において有限性を考慮すると、設計者は設計可能な理想的な仕様を記述できない。

証明 定理16により有限性を考慮した設計による設計解は様々な予期せぬ機能を持つ。一方、設計が可能な場合には、定理8より $T_0 \supset T_1$ (属性概念位相は機能既

念位相より強い位相である) でなければならないので、異なる機能を持つ実体は異なる属性を持つ。よって、現実的知識において設計仕様を記述する場合には、理想的な仕様を記述することはできない。(証明終り)

本項では、不完全な設計仕様が設計の進行と共に Refinement される過程に注目して設計実験の結果を分析する。

図 3.5 に示した設計仕様に基づく体重計の設計を課題とした設計実験 [Takeda91] の過程に現れた抽象的な実体概念および抽象的な実体概念に対して行なわれた評価の基準を図 3.6 に示す。

以下の条件を満たす体重計の試作機を設計してください。

1. 下の範囲内に収まるように設計して下さい。
縦 300mm、横 250mm、厚さ 50mm
2. 足を置く場所は指定しても構いません。
3. 電気系は用いてはいけません。
4. 構成部品の強度について厳密に考える必要はありません。
5. 100kg まで測れるものとします。
6. 100kg の加重をかけると、体重計の蓋が 5mm だけ下がるものとします。
7. 最終的に方眼紙に主要寸法を入れて定規を用いて製図して下さい。
8. 歯車等はカタログを参照して下さい。

図 3.5: 体重計の設計仕様

この設計過程で現れた評価の基準 (例えば文字盤の可視性) は必ずしも設計の初期の段階で与えられた設計仕様の具体化ではない。そこで、このような評価基準が導入された例をプロトコルデータ (図 3.7) から分析する。

この過程に現れた実体概念としては、体重計・上板 (蓋)・枠・バネ・バネ止め具・ネジがある。また、この過程では、発話 1・発話 4・発話 6 が問題提起に当たり、3 つの設計サイクルが存在する。

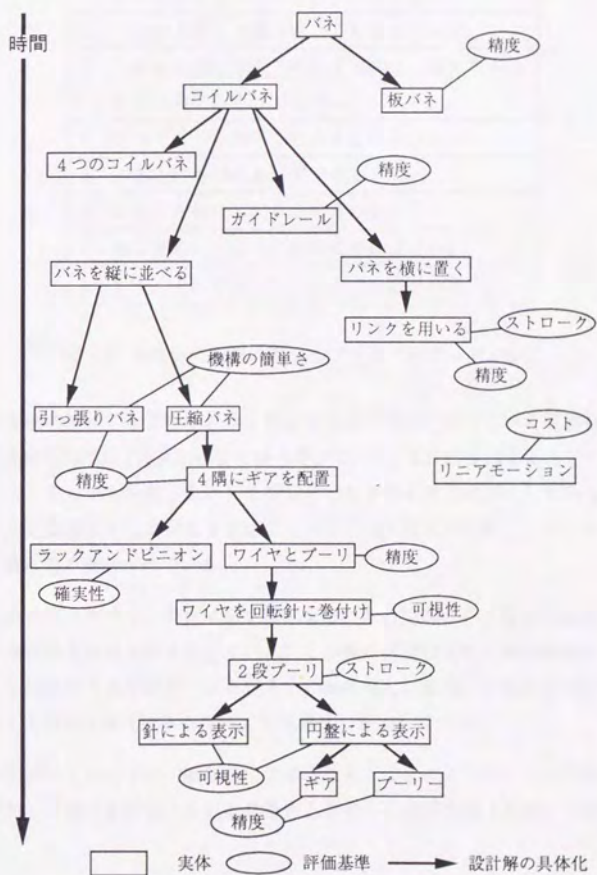


図 3.6: 設計実験中に現れた実体概念および評価基準

1	上板を持って持ち上げた時に、上板がとれてしまわないようにしなくてはいけない。
2	バネの上端と下端を止めてしまえばいい。
3	自重は1.2kg程度でバネは100kgに耐えられるものなので、それで良い。
4	それではどうやってバネを止めるのか。
5	バネ止め具があるはずである。
6	でもどうやって組み立てるのか。
7	棒と蓋というように分けてやれば良い。
8	しかしそれでは上にネジがでて格好が悪い。

図 3.7: 体重計の設計に関するプロトコルデータ (部分)

まず、最初の設計サイクルにおける発話1はその時点で考えている解候補に対し、現実に存在する体重計(体重計はよく持ち運びされる)と比較検討することにより、設計仕様「持ち運んでも分解しない」を補完をしてそれを問題提起としている。この問題提起に対し発話2で提案があり発話3ではその持ち運んで分解しないという評価基準で設計解候補が評価されている。

次の設計サイクルでは、発話4,5では上板とバネの接続という位相的關係から接続方法へと属性概念空間を詳細化している。この様に詳細化された属性概念の積として表現される抽象的な実体概念であるバネ止め具に対し、現実に存在する実体を想起することにより設計仕様「組み立て性」を明確化し評価している。

最後の設計サイクルでは、組み立て手順を考えることにより考えられた抽象的な実体概念に対し、設計者が知っている体重計と比較し、設計仕様「美観」の補完をしている。

このプロトコル例から、設計における一つの問題解決のプロセスである設計サイクルの中においても設計者の設計解候補に対する問題意識がそこで考えられた抽象的な実体概念や現実に存在する実体に引きずられて変遷していく事がわかる。

先ほどのプロトコルの例では、バネ、上板、バネ止め具、ネジといった現実存在する実体を思い浮かべることにより、「組み立て性」といった仕様が評価可能になり、さらに他の設計解候補と比較することにより「美観」といった他の設計解候補と差別化をはかろうとする設計仕様が加えられたと考える。このように考えると、設計仕様の明確化の種類は大きく次の2つに分けられる。

- 設計仕様の具体化

2.2項で述べたように、設計仕様は必ずしも機能的仕様として与えられるわけではなく、物理法則レベルや属性レベルで与えられている仕様が存在する。このような機能的仕様以外の仕様が、解候補が具体的な実体概念として想起されることにより具体的な問題として適用可能になる。

- 設計仕様の補完

設計者は単に設計仕様を満たすものをつくり出すだけでは満足せずに、できる限り良いものを作り出そうとする。その過程においてどういう設計解を良い設計解と考えるかの基準を表明している。

この設計仕様の具体化は次の位相空間への操作として定式化される。

設計知識操作 2 実体概念の詳細化に基づく設計仕様の明確化 (属性概念位相空間の Refinement)

1. 設計知識操作 1 と同様に抽象的な実体概念 s_{an} に対応する実体概念集合を検索し、その中から有限個の実体概念を取り出した集合 S_{nc} を考える。

$$\begin{aligned} s_{an} &\in \tilde{S}'_n \\ T_a^o &= \{T | T \in T_o, (s_{an} \in T)\} \\ S_{nc} &\subset \bigcap_{T \in T_a^o} T \end{aligned}$$

2. 抽象的な実体概念を現実存在させるために必要な属性概念を、このようにして得られた実体概念集合が共通する属性概念 T_{nc}^o を検索する。

$$T_{nc}^o = \{T | T \in T_o, \forall s \in S_{nc} (s \in T)\}$$

3. この属性概念集合と属性概念で与えられた設計仕様 T_{sn}^o の積集合が存在する場合には、対象とした実体概念に対する設計仕様として設計仕様に加えると共に、ワークスペースの属性概念に加える。また、設計知識操作1と同様に、設計知識である抽象概念集合 T に含まれる抽象概念 T をワークスペースにおける抽象概念集合 T_n^o に含まれる T_n^o に1対1で対応付ける写像 f_n を考える。ここで、得られた属性概念集合系をワークスペースに加えることにより、属性概念位相空間を詳細化する $((\tilde{S}_n^o, T_n^o) \rightarrow (\tilde{S}_{n+1}^o, T_{n+1}^o))$ 。

$$\begin{aligned} T_{sn+1}^o &= (T_{nc}^o \cap T_{sn}^o) \cup T_{sn}^o \\ T_{n+1}^o &= f_{n+1}(T_{nc}^o) \cup T_n^o \end{aligned}$$

また、設計仕様の補完は次のような定理により定式化される。

定理 19 設計者は異なる2つの実体概念を比較することにより機能概念空間に属する異なる抽象概念の近傍系を見つけることができる。

証明 現実的知識がハウスドルフ空間であることより自明。

このことは、設計者がある機能を実現するために設計過程において想起した複数の抽象的な実体概念について、各々に対応する現実存在する実体概念を想起し、比較することにより設計の初期の段階では考慮していない機能概念を見つける可能性を示している(図3.8)。この仕様の補完としては次の位相空間への操作として定式化される。

設計知識操作 3 実体概念の比較による設計仕様の補完 (機能概念位相空間の *Refinement*)

1. 定理16にも述べられているように、設計解を設計知識を用いて評価すると、それまでの設計過程で考慮されていなかった機能概念の集合 T_u^1 が空集合でない可能性がある。

$$\begin{aligned} s_c &\in \tilde{S}_n^o \\ T_u^1 &= \{T | T \in T_1, (s_c \in T), T \notin T_{sn}^1\} \end{aligned}$$

2. この予期せぬ機能の内、設計解の価値を高める機能の一部 T_{uu}^1 を発現させることと、価値を下げる機能 T_{ud}^1 の一部を発現させないことを設計仕様に加える ($T_{sn}^1 \rightarrow T_{sn+1}^1$)。

$$\begin{aligned} T_{uu}^1 &\subset T_u^1 \\ T_{ud}^1 &\subset T_u^1 \\ T_{sn+1}^1 &= T_{sn}^1 \cap \bigcap_{T_1 \in T_{uu}^1} T_1 \cap \bigcap_{T_1 \in T_{ud}^1} \bar{T}_1 \end{aligned}$$

3. 最後に、ここで得られた新たな設計仕様に対し、ワークスペースの台集合に含まれる実体概念から構成される部分集合系 (T_{n+1}^1) を求めることにより、機能概念位相空間を詳細化する ($(\tilde{S}_n^1, T_n^1) \rightarrow (\tilde{S}_{n+1}^1, T_{n+1}^1)$)。

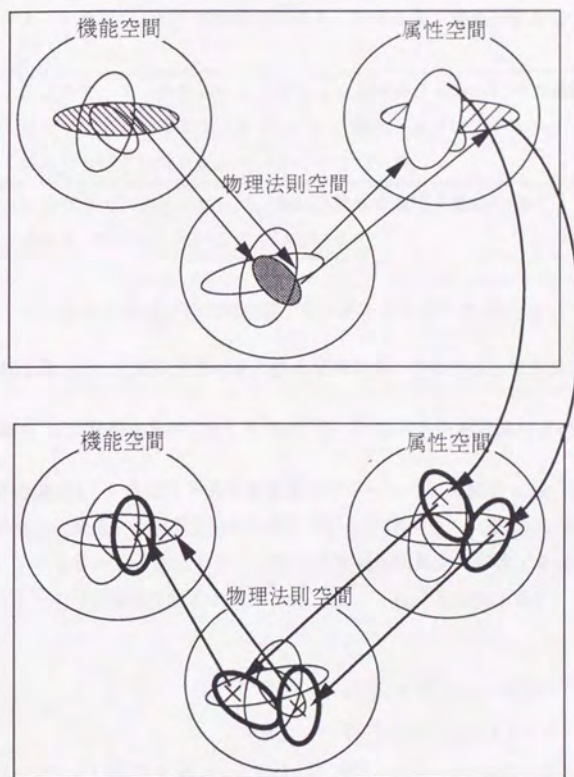
$$T_{n+1}^1 = T_n^1 \cup \{T' | T' \in T_{sn+1}^1 - T_{sn}^1, T' = T \cap \tilde{S}_n^1\}$$

3.1.3 実体概念を用いた機能設計

表2.1に示した設計実験における設計知識の種類分析において、ドイツ流設計方法論 [Rodenacker70, Pahl88] などの設計方法論で指摘されているような機能分解を行うための知識である「機能」→「機能」という知識が存在していない。しかし、設計者は体重計の持つ「人の体重を計測する」という機能のみを考えているわけではなく、「重さを変位に変換する」機能などの「人の体重を計測する」ために必要な幾つかのサブ問題に分割して考えていることが示されている。すなわち、設計者は何らかの形で機能分解を行っていると考えられる。

表2.1において機能との対応関係が知識として利用されている概念は実体だけである。そこで、本研究では設計者が陽に機能分解ということを行わずに、「機能」→「実体」、「実体」→「機能」という知識を組み合わせることにより機能分解に相当する操作を行なっていると考える。

例えば、3回行なわれた体重計の設計実験の全てにおいて通常使われている体重計に関する言及があった。これは、実際の体重計の持つ機能を分析する際に、抽象的な概念のみで考えるのではなく、実体概念を持つてくること有利なことを示している



実体概念を利用した位相のRefinement

図 3.8: 設計仕様の補完

と考える。このような実体概念の想起は必ずしも仕様で与えられるようなものに対してのみ行なわれるのではなく、特定の機能を実現する実体概念を想起することができる場合にも行われる。図3.9は精度良く上下方向の変位を回転に変換する機能からマイクロメーターを想起し、その機構を分析することにより、機能分解をしている。

1	ところで、マイクロメーターはちょっとした動きをあれだけの運動に変えていてしかも精度がすごくいい。機構も簡単に違いはない。体重計も同じ原理で動いているのではないか。
2	やはりマイクロメーターだ。あれは歯車で減速を重ねた端に渦巻きバネがついているのではないか？

図 3.9: 体重計の設計に関するプロトコルデータ (部分)

この実体を媒介とした機能分解は次の様な位相空間への操作として定式化できる。

設計知識操作 4 実体概念を媒介とした機能分解 (機能概念位相空間の *Refinement*)

1. 全体の機能 T_a^1 を実現する実体概念集合から一つの実体概念 s_a を選択し、その実体概念に関連する物理法則概念集合 $T_a^p = \{T_{s1}^p, T_{s2}^p, \dots, T_{sn}^p\}$ を選択する。次に、この全体の実体概念から、これらの物理法則概念に関連する部分を取り出すことにより実体概念集合 $S_{sub} = \{s_{s1}, s_{s2}, \dots, s_{sn}\}$ に分解する。

$$s_a \in T_a^1$$

$$T_a^p \subset \{T | T \in T_p, (s_{an} \in T)\}$$

$$T_a^o = \{T | T \in T_o, s_a \in T\}$$

$$\{T | T \in T_o, s_{si} \in T\} \subset T_a^o$$

$$s_{si} \in T_{si}^p$$

この時、各実体概念を分解する際に分解した実体間の関係の情報がなくなるために、

$$T_a^o \supset \{T | T \in T_o, \exists s \in S_{sub} (s \in T)\}$$

となる。

2. 次に、分解した各実体概念 s_{si} に対応する機能概念 T_{si} を一つずつ選択することによりサブ機能概念集合 T_n^1 を得る (図 3.10)。

$$T_{si}^1 \in \{T | T \in T_1, s_{si} \in T\}$$

$$T_n^1 = \{T_{s1}, T_{s2}, \dots, T_{sn}\}$$

3. また、ここで得られた機能概念を機能概念位相に加えると共に、設計知識操作 1 の 4,5 の手順と同様に、新しく得られた実体概念をワークスペースの台集合に加え、属性概念位相空間、機能概念位相空間の詳細化、メタモデルの進化とメタモデル位相空間の詳細化を行なう。

また、このようにして得られたサブ機能を実現する設計解を提案する操作は次の位相空間への操作として定式化される。

設計知識操作 5 機能の実体概念による実現 (属性概念位相空間の Refinement)

1. 機能 T_1 を実現する実体概念集合から一つの実体概念 s を選択する。

$$s \in T_1$$

2. 属性空間 (S_k, T_0) に関する知識を利用することにより、選択された実体概念に関連する全ての属性概念集合 (T_{n+1}^0) を得る。

$$T_{n+1}^0 = T_n^0 \cup \{T | T \in T_0, s \in T\}$$

3. 後は、設計知識操作 1 の 4,5 の手順と同様に、新しく得られた実体概念をワークスペースの台集合に加え、属性概念位相空間、機能概念位相空間の詳細化、メタモデルの進化とメタモデル位相空間の詳細化を行なう。

また、先に述べた機能分解の結果得られたサブ問題である各サブ機能は、特定の実現構造に依存しているために、各々のサブ機能間を結び付ける実現構造間の制約が存在する。しかし、設計者がより良い設計解を得ようとする過程において、各機能に

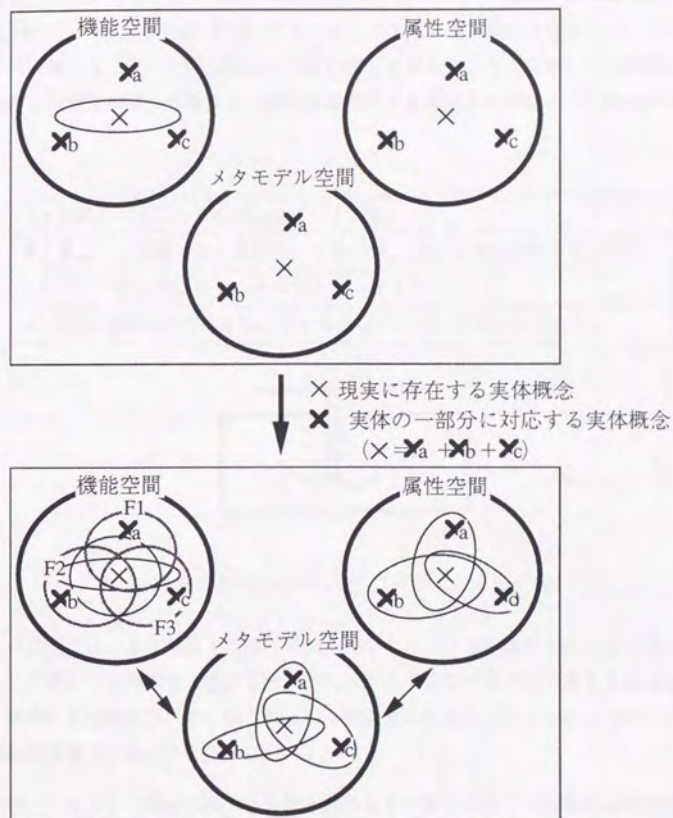


図 3.10: 現実に存在する実体概念を媒介とする機能分解

対し様々な実現構造を考え出し検討するために、サブ機能間の制約を弱める場合がある。

図3.11に示すプロトコルにおいて設計者はまず普通のパネばかりの構造を特徴的な部品(ギア、パネ、表示盤)を用いて絵に書くことにより、機能分解をした。この機能分解の対象となったパネの変位は上下方向が仮定されていた。しかし、実現構造を考える際に発話2に見られるように実現構造に関する制約を弱めるような操作が行われた。

1	普通のパネばかりの構造はこう(下図)。
2	まあパネは縦でなく横に置いてもいい。運動を横に変換するわけか。
3	一つパネを横に置く場合を考えてみよう。
4	90度運動を変換するわけだからリンクか何かを使うのだろう。

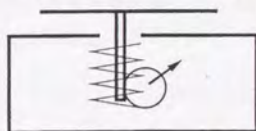


図 3.11: 体重計の設計に関するプロトコルデータ(部分)

この過程では、まず発話1で既存のパネばかりという実体概念を持ってくることによって特徴的な実体概念の要素を分解した。次に発話2でその中で重さを縦方向の変位に変換する機能について、縦方向という制約を弱めることにより横向きのパネという別の実体概念の組合せを提案している。

また、このように機能に関する制約が弱められた結果として、分解されたサブ機能間の実現構造の接続がうまくいなくなる場合がある。このような時には、発話4のように設計者は各機能の実現構造に機能を実現する実体を組み合わせるために補間的な機能を想起することにより全体としての機能の発現をはかる。図3.11のプロトコルでは、パネの向きに関する制約を弱めた影響として、体重による力によって起こる運動の方向を縦から横に変換するという機能が補間的な機能として必要であることを指

摘している。

この機能の制約の緩和および機能の統合は次のような位相空間への操作として定式化できる。

設計知識操作 6 機能の制約の緩和と機能統合時の補完的な機能の発見 (機能概念位相空間の *Refinement*)

1. 機能 T_i^1 に対する制約の緩和は、機能を発現する対象に関する制約を緩和した機能 $T_i'^1$ に置き換えることで、機能概念に属する実体概念を増加させることに対応する。

$$T_i'^1 \supset T_i^1$$

2. 全体の機能 T_a^1 を実現するためにサブ機能概念集合 T_{sub}^1 を統合する過程では、得られたサブ機能に対応する実体概念集合 S_{sub} が持つ属性概念集合 T_a^0 を属性概念として持つ実体概念である s_a を得る。

$$T_a^0 = \{T | T \in T_0, \exists s \in S_{sub} (s \in T)\}$$

$$s_a \in \bigcap_{T \in T_a^0} T$$

3. ここで、この s_a が全体の機能 T_a^1 を満たさない場合には、サブ機能概念集合に対応する実体を持つ全ての属性概念集合 T_a^0 を含みながら T_a^1 を実現している実体概念 s'_a を考え、 s'_a が持つ機能の一部を補完的な機能概念集合 T_c^1 として機能概念位相に加える。

$$s'_a \in T_a^0 \cap T_a^1$$

$$T_c^1 \subset \{T | T \in T_1, s'_a \in T\} - T_{sub}^1 - \{T_a^1\}$$

4. 最後に、ここで得られた機能概念集合に対し、ワークスペースの台集合に含まれる実体概念から構成される部分集合系 (T_{n+1}^1) を求めることにより、機能概念位相空間を詳細化する $((\tilde{S}_n, T_n^1) \rightarrow (\tilde{S}'_n, T_{n+1}^1))$ 。

$$T_{n+1}^1 = T_n^1 \cup \{T' | T \in T_c^1, T' = T \cap \tilde{S}'_n\}$$

3.1.4 実体概念を媒介とした知識の導入

実際の設計過程において、設計者は設計対象物を様々な観点からモデル化する。例えば、熱の流れを知りたい時には設計対象物を発熱体と伝熱体とみなしてモデル化し、機構学的な動きを考える場合には、設計対象物をリンクやスライダといった機構要素としてモデル化することにより、その振舞いを確認し評価している。これは、工学には材料力学・流体力学・電子工学といったように、対象とする領域を特定することにより効率的に知識を使うことができる体系が存在しており、設計者もこのような領域にしたがって知識を整理し利用していることに起因していると考えられる。そこで、設計者の知識が上記のように整理されていると考え、設計対象知識の導入、特に設計対象の挙動を調べ評価するための知識の導入はこのような領域を単位として導入されると考える。

また、このような設計対象知識は2.1節で述べたメタモデル空間の位相である物理現象知識と同様に、設計対象の属性間の関係を表現したものである。一方、本研究では、3.1.1項でも述べたように、設計を設計者が属性概念空間を詳細化していく過程としてモデル化しているので、このような知識の導入の過程を、属性概念空間の詳細化の結果として新たに得られた属性概念をキーとして物理法則概念が導入される過程としてモデル化する。つまり、設計者は実体概念を媒介とし、様々な属性概念を考慮することにより、設計解を評価するために必要な知識を導入していると考えた。

そこで、この知識の導入過程を次のような位相空間への操作として定式化する。

設計知識操作 7 実体概念の詳細化に基づく物理法則概念の導入 (メタモデル位相空間の Refinement)

1. 物理法則 $P_j(a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jN_j}) = 0$ (ただし、 a_{ji} は属性概念) に対応した物理法則概念位相を T_j^p と、属性概念 a_{ji} に対応する属性概念位相を T_{ji}^0 とする。また、物理法則概念集合の要素をその法則が関連する属性概念位相の集合に写像する関数を f_{pa} とする。

$$T_j^p = \bigcap_{i=1}^{N_j} T_{ji}^0$$

$$f_{pa}(T_j^p) = \{T_{j1}^0, T_{j2}^0, \dots, T_{jN_j}^0\}$$

2. 設計知識操作 1 により実体概念が詳細化される場合や設計知識操作 5 により機能の実現を行なう場合には、新たな属性概念集合 T_n^o がワークスペースに導入される。全て (N_p 個) の物理法則の中で、新たな属性概念が物理法則に関連する属性概念位相の集合に含まれる物理法則概念集合 T_n^p を検索する。

$$T_n^p = \{T_p | T_p \in T_p, \exists T_0 \in T_n^o (T_0 \in f_{pa}(T_p))\}$$

3. さらに、ここで得られた物理法則概念が適用可能なメタモデルについて、物理法則概念を適用することによりメタモデルを進化させ、メタモデル位相空間を詳細化する ($(\tilde{S}_n', M_n') \rightarrow (\tilde{S}_{n+1}', M_{n+1}')$)。

$$M_{n+1}' = M_n' \cup \{M_{n+1} | M_n \in M_n', T_p \subset T_n^p, M_n \subset T_p, M_{n+1} = M_n \cap T_p\}$$

また、抽象的な実体概念に対応する属性が詳細化されることにより、設計者は特定の問題解決のための知識を導入することがある。先ほどの体重計の設計プロトコルを例にとると、設計解の詳細化がかなり進みバネの諸元を決める段階では、対象とする実体がコイルバネに限定されていることを利用して、バネの公式という計算式を用いてバネの巻数や線の太さという属性を決定している。これは、属性を詳細化した結果として対象とする実体を制限することにより、特定の設計方法論が適用可能になったと考える。この設計方法論の利用による実体概念の詳細化は設計知識操作 1 で示した操作の特殊な例であり、次の位相空間への操作として定式化する。

設計知識操作 8 特定問題に対する設計方法論の利用 (属性概念位相空間の *Refinement*)

1. ある段階において、設計者の思考のワークスペースに存在する実体概念集合 \tilde{S}_n' の元である抽象的な実体概念 s_{an} に対して、特定の設計方法論が存在する場合には、それに従って実体の詳細化を行ない、イメージとしての実体概念 s_{in} を導き、属性空間 (S_k, T_0) に関する知識を利用することにより、関連する全ての属性概念集合 (T_{n+1}^o) を得る。

$$s_{an} \in \tilde{S}_n'$$

$$s_{an} \notin \tilde{S}$$

$$T_{n+1}^0 = T_n^0 \cup \{T | T \in T_0, (s_{in} \in T)\}$$

$$\tilde{S}_{n+1}' = \tilde{S}_n' \cup \{s_{in}\}$$

2. 後は、設計知識操作1の4,5の手順と同様に、新しく得られた実体概念をワークスペースの台集合に加え、属性概念位相空間、機能概念位相空間の詳細化、メタモデルの進化とメタモデル位相空間の詳細化を行なう。

このように、知識を限定することにより設計者が持っている知識が定理9を満たす(狭義の)現実的知識となった際の一般設計学の適用は先に述べた全数対応モデルや計算モデルおよび機能空間への距離への導入の研究 [Taura91] や [Reich95] の研究があり、またこの段階以降のモデル化の手法は様々な形で実現されているので、本研究ではこれ以上の詳細化過程には触れないこととする。

3.1.5 設計過程における意思決定プロセス

3.1.2項で述べたように設計者は設計を進めていく過程において設計仕様を詳細化している。しかし、このような設計仕様の明確化過程もやはり有限であるので定理18に述べられたように理想的な設計仕様が記述できない。また、このようにして与えられた設計仕様には多くの場合トレードオフが存在し(コストと性能など)、全てを同時に満たすような設計解を作り出すことは不可能である場合が存在する。そのために設計者は設計仕様を付け加えていくことにより設計解を絞り込むだけでなく、場合によっては設計仕様を緩和することが必要となる。

そこで、このような設計仕様を絞り込んだり緩和したりする過程を記述するために、これらの操作をするための軸を考える必要がある。そこで、ここでは「設計仕様として与えられた機能に対する価値を評価する基準」と定義した「評価基準」という概念を導入する。つまり、設計者は各機能に対して評価基準に基づき良い評価が得られることを望む場合は、その設計仕様を満たす設計解は絞りこまれ、悪い評価で妥協する場合は設計仕様は緩和され設計仕様を満たす設計解の数は増える。

ここでは、自転車とバックパックを接続させる器具の設計に関する設計実験のプロトコルデータ [Drost96] を例にとり、どの様に設計仕様が絞り込まれ、また緩和され

ていくかを分析する。この設計の初期段階において接続するバックパックの重心の位置という属性に関連付けられた自転車の安定性という設計仕様が補完されている。ここで、自転車とバックパックを接続させる位置関係を実現する様々な設計候補を網羅的に考える中(図 3.12)で、定理 19 で述べた複数の実体概念の比較を行なうことにより、ペダルの漕ぎやすさ(図 3.12-(1))、ハンドルのまわしやすさ(図 3.12-(2))といった様々な設計仕様が補完された。また、自転車の安定性という評価基準について設計解を絞り込むことによって考えられたバックパックを小さなトレーラで引っぱる(図 3.12-(4))という一つの設計候補からは、バックパックの安定性などの設計仕様が補完された。

また、最終的に設計者は図 3.12-(3) を解として選択した。この設計解が選ばれた理由としては、その他の設計解が持っている欠点を選ばれた設計解における自転車の安定性の低下よりも問題であると考えたことを示している。つまり、自転車の安定性という基準については評価基準を緩和したと考えられる。設計者はどのような設計解を作りたいかということを考慮し、評価基準間に重みづけをすることにより、設計解の絞り込みを行っていると考えられる。

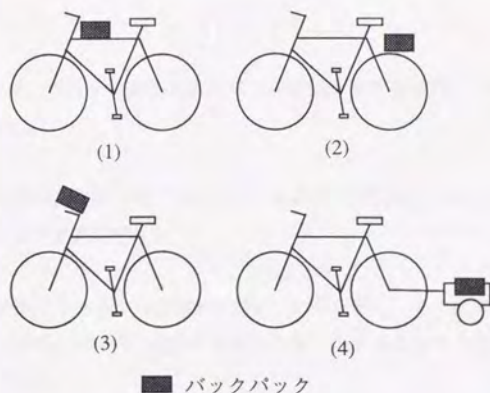


図 3.12: 自転車とバックパックの位置関係の設計解候補

この意思決定プロセスを設計者の考えている実体概念集合における位相空間への操

作として定式化する (図 3.13)。

設計知識操作 9 設計解選択のための仕様の変更 (機能概念位相空間の Refinement)

1. 評価基準を持つ機能に対し連続な評価関数 $f_i: \tilde{S} \rightarrow R(R: \text{実数体})$ を考えると、定理 12 よりこの関数は最大値、最小値を持つ。ここで、評価関数に対し設定した最大値よりも小さい値を閾値 $x_{it} \in R$ とし、この閾値を上回ることを設計仕様とする。この設計仕様を満たす実体概念集合 S_{ix} は次のようになる。

$$S_{ix} = \{s | s \in \tilde{S}, f_i(s) > x_{it}\}$$

この時、設計解を絞り込む操作は、閾値 x_{it} を増加させることに相当し、設計仕様の緩和は閾値の減少に相当する。設計者は評価基準に基づき設計解を絞り込むために、各々の評価基準に対して閾値を増加させる。

2. ここで、全ての評価関数 ($F_s = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_n\}$) に対し閾値を増加させると、全ての閾値を満足する設計解が存在しない場合がある。

$$\emptyset = \bigcap_{i=1}^n \{s | s \in \tilde{S}, f_i(s) > x_{it}\}$$

この時には、幾つかの評価関数に対する閾値を減少させることにより、解空間を確保する。

このように複数の設計解を様々な観点から分析して設計解を選択するという設計行為は次の定理により定式化できる。

定理 20 複数の観点から様々な設計解候補について分析し、その結果として一つの設計解を選択する設計において、設計とは第 1 分離公理を満たすまで機能概念位相空間を強めることである。

証明 複数の設計解を様々な観点から分析して設計解を選択するためには、お互いを特徴付ける価値的な判断に基づいた近傍系を考えなければならない。このことは、相異なる設計解候補である実体概念に対して特徴的な近傍を考え、比較す

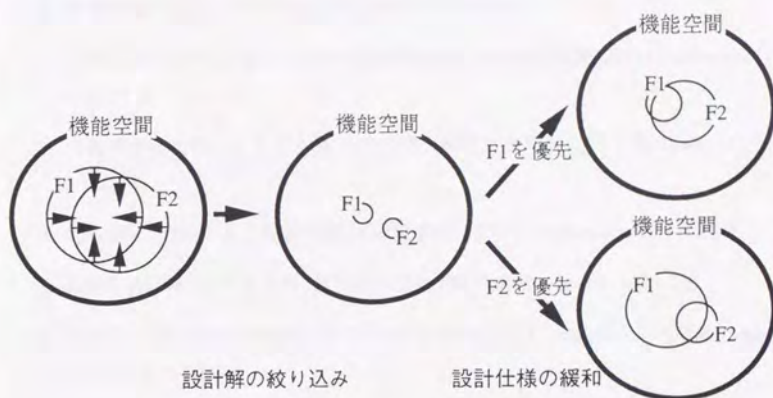


図 3.13: 設計解の絞り込み

ることを意味している。これは、定理 17 に述べた Kolmogorov 空間よりも強い相異なる 2 点 x, y に対して x の近傍 U と y の近傍 V で、 $x \notin V, y \notin U$ となるものが存在するという第 1 分離公理 (Fréchet の公理) を満たすまで機能概念位相空間を強めることが必要であることを示している。(証明終り)

また、機能概念空間が定理 20 を満たし設計が可能な場合には、定理 8 より属性概念空間は機能概念空間より強い位相となり、属性概念空間も第 1 分離公理を満たす。また、第 1 分離公理は Kolmogorov の分離公理より強い分離公理であるので、定理 20 を満たす設計は定理 17 で述べた一つの設計解を得るための設計の条件を満たしている。

3.1.6 設計知識操作論の一般性

前小節までにおいて、実際の設計過程である設計実験の結果に基づいて 9 つの設計知識操作を提案し、その各々を位相空間に対する操作として定式化した。そこで、本節では、以下に述べる 9 つの設計知識操作の完備性および一般性について議論する。

1. 実体概念の詳細化 (属性概念位相空間の Refinement) … 3.1.1項
2. 実体概念の詳細化に基づく設計仕様の明確化 (属性概念位相空間の Refinement)
… 3.1.2項
3. 実体概念の比較による設計仕様の補完 (機能概念位相空間の Refinement) …
3.1.2項
4. 実体概念を媒介とした機能分解 (機能概念位相空間の Refinement) … 3.1.3項
5. 機能の実体概念による実現 (属性概念位相空間の Refinement) … 3.1.3項
6. 機能の制約の緩和と機能統合時の補完的な機能の発見 (機能概念位相空間の Re-
finement) … 3.1.3項
7. 実体概念の詳細化に基づく物理法則概念の導入 (メタモデル位相空間の Refine-
ment) … 3.1.4項
8. 特定問題に対する設計方法論の利用 (属性概念位相空間の Refinement) … 3.1.4項
9. 設計解選択のための仕様の変更 (機能概念位相空間の Refinement) … 3.1.5項

本研究では、Refinement 設計過程モデルにおける位相の Refinement 過程を、設計者の持っている設計知識と考えられる実現可能な実体概念集合を台集合とする位相空間に対する操作ではなく、設計者の思考のためのワークスペースである設計者が考えている実体概念集合を台集合とした位相空間に対する操作と考え、これらの操作と設計知識との関係を分析した。そこで、Refinement 設計過程モデルにおける操作とこれらの設計知識操作の関係を分析する。

Refinement 設計過程モデルにおいて、設計とは一般設計学におけるメタモデルの進化と機能や属性などで与えられる設計仕様を Refinement する過程としてモデル化されていた。また、メタモデルを用いた設計とは、機能により与えられた設計仕様を機能を物理法則によって記述できると仮定したメタモデルである機能素で表現し、そのメタモデルを進化させていくことにより属性概念空間への写像を行なう操作である。

つまり、Refinement 設計過程モデルにおける設計知識操作としては、大きく2つに分けることができる。

1. メタモデルの進化

2. 設計仕様の Refinement および機能概念以外の設計仕様に対する操作

これに対し、本研究で提案した設計知識操作の内、設計知識操作4の機能分解、設計知識操作6の機能の制約の緩和と機能の補完は、設計仕様として与えられた抽象的な機能をメタモデルによる設計を行なうための設計仕様に分解するための操作であり、設計知識操作5の機能の実現が設計仕様をメタモデルである機能素で表現するための操作である。また、設計知識操作1の実体概念の詳細化、設計知識操作7の設計知識の導入、設計知識操作1の特殊例である設計知識操作8の特定問題の設計方法論の利用の3つの操作がメタモデルの進化に相当する設計知識操作であり、これらの操作の結果として設計解が得られることになる。

さらに、設計知識操作3の実体概念の比較、設計知識操作9の設計解選択のための仕様の変更は Refinement 設計過程モデルで提案されていた不完全な設計仕様を扱うための設計知識操作であり、設計知識操作3の設計仕様の明確化は機能概念以外の抽象概念で与えられる設計仕様を扱うための操作である。また、設計知識操作2は機能以外の設計仕様である属性による設計仕様を扱うための操作である。

つまり、この9つの設計知識操作で Refinement 設計過程モデルで提案されている設計における操作が全て扱う事ができ、この事はこれらの9つの操作で Refinement 設計過程モデルに沿った設計が可能であることを示している。

また、本操作の一般性を考慮するために、2つの一般的な設計方法論における設計知識操作との比較を行なう。まず、PahlとBeitz[Pahl88]による設計方法論を考える。このPahlとBeitzの設計方法論における概念設計段階の操作としては次の操作がある。

1. 問題を抽象化し、本質を確定する。
2. 機能構造を構築する (全体機能 - 下位機能)。
3. 下位機能を実現する設計解原理を探索する。
4. 適切な組合せを選択する。

5. 代替概念を確定する。
6. 技術的、経済的基準により代替概念を評価する。

ここで、これらの操作に対応する本研究で提案した設計知識操作を考える。まず、1.の操作であるが、この操作は設計仕様を与えるための操作であるために、本研究の対象外となっている。また、2.の操作は設計知識操作4の機能分解に相当し、3.の操作は設計知識操作5の機能の実現に相当する。4.5.の操作は設計知識操作6の機能の統合の操作に対応し、6.の操作は設計知識操作3の実体概念の比較や設計知識操作9の設計仕様の変更の操作に相当する。

次に、Suh[Suh90]の公理的設計方法論について考える。この設計方法論において設計過程は創造過程と分析過程のフィードバックループと定式化している。また、この創造過程において行なわれる操作としては、次の2つの操作がある。

1. 市場の要求を必要機能の形に変換することにより問題を設定する。
2. 各必要機能に対し、機能を実現するための実体を考え、その機能に影響を与える実体に対して設定できる設計パラメータと対応付ける。
3. さらに、この必要機能に対し階層構造を考え、各階層の必要機能に対し、同じように階層化した実体を対応づけ、2.と同様にその実体の持つ設計パラメータと対応付ける。

この場合においても、1.の操作は設計仕様を与えるための操作であり、その一部は本研究の対象外となっているが、市場の要求から必要機能に対する要求の強さを調整する操作などは設計知識操作3の実体概念の比較や設計知識操作9の設計仕様の変更の操作に相当する。また、2.の操作は設計知識操作5の機能の実現に相当する。また、3.の操作における機能の階層構造を考える操作は設計知識操作4の機能分解に相当し、実体についても階層構造を考え、関連するパラメータを詳細化する操作は設計操作1の実体概念の詳細化に相当する。

また、分析過程においては、次の2つの公理に基づいて機能の実現方法や必要機能による問題の設定を評価する。

独立公理 必要機能の独立性を保て

情報公理 情報量を最小化せよ

これらの操作については、Suhの方法による良い設計解の定義を反映したものであるが、本研究においては良い設計解に対する定義がないためにこのような操作が存在しない。

以上の議論から、本研究で提案した設計知識操作論は、これらの2つの一般的な設計方法論における設計知識操作を含んでおり、一般的に行なわれる操作と考えられる。

3.2 設計知識操作論に基づく設計過程モデル

本節では、2.2.1項で述べた計算可能な設計過程モデルを基礎に、前節で述べた設計知識操作の定式化に基づいた設計過程モデルについて議論する。

まず、計算可能な設計過程モデルの特徴について述べると、次の4点がある。

1. 設計の流れを多重世界により定式化
2. 設計者の思考のレベルを対象レベルと行為レベルに分割して、行為レベルの推論が対象レベルへの操作を駆動すると定式化
3. 対象レベルの操作を制御するための行為レベル推論のための知識(設計対象知識を状況に応じて利用するための知識)を明示的かつ対象依存ではない形で記述
4. 対象レベルの操作を、対象レベルの知識の形式を定めることにより設計対象知識の使い方(アブダクションや演繹などの推論)として定式化

しかし、この設計過程モデルは対象レベルの知識の形式を概念の詳細化方向の反対方向(属性→機能、実体→機能…)にのみ限定しているが、実際の設計では、3.1.4項で述べたように、設計者が用いる知識としては、設計対象を解析するための知識やある特定の問題に応じた設計方法論といった知識などの様々な形式の知識が利用されている。よって、設計過程モデルにおけるこの制限は、実際にCADシステムを構築する際に問題になると考えられる。

そこで、本研究では設計過程モデルにおける次の3つの対象レベルの操作を、前節で述べた設計知識操作論に基づく対象レベルの操作に置き換えることにより設計知識操作論に基づく設計過程モデルを提案する。

- アブダクション

設計解を詳細化するために、仮説を形成する操作

- 演繹

設計対象の持つ性質や挙動を導く操作およびその性質や挙動を評価する操作

- サーカムスクリプション
知識の矛盾を解消する操作

以下では、この3つの対象レベルの操作と3.1節で述べた以下の9つの設計知識操作との関係を考察することにより、設計知識操作論に基づく設計過程モデルを提案する。

1. 実体概念の詳細化 (属性概念位相空間の Refinement)
2. 実体概念の詳細化に基づく設計仕様の明確化 (属性概念位相空間の Refinement)
3. 実体概念の比較による設計仕様の補完 (機能概念位相空間の Refinement)
4. 実体概念を媒介とした機能分解 (機能概念位相空間の Refinement)
5. 機能の実体概念による実現 (属性概念位相空間の Refinement)
6. 機能の制約の緩和と機能統合時の補完的な機能の発見 (機能概念位相空間の Refinement)
7. 実体概念の詳細化に基づく物理法則概念の導入 (メタモデル位相空間の Refinement)
8. 特定問題に対する設計方法論の利用 (属性概念位相空間の Refinement)
9. 設計解選択のための仕様の変更 (機能概念位相空間の Refinement)

これらの操作の内、1. 実体概念の詳細化、4. 機能分解の操作、5. 機能の実現、8. 特定問題に対する設計方法論の利用は、設計対象の記述を計算可能な設計過程モデルにおける概念の詳細化方向に進める操作であり、アブダクションによる仮説形成による設計解の詳細化に対応する。

また、2. 設計仕様の明確化、3. 設計仕様の補完、7. 設計知識の導入は、設計者が考えている設計対象の持つ属性やその挙動を調べて評価する行為であり、演繹の操作に対応する。

6. 補完的な機能の発見、9. 仕様の変更は設計者が最初においた仮定が設計知識により矛盾であることが判明したために行なわれる操作であり、サーカムスクリプションに対応する。また、6. 機能の制約の緩和については対応する操作がないが、これは機能分解をする対象レベルの知識記述の問題として扱われていたものと考えられる。つまり、この操作は問題を提示する段階である問題提起のレベルの操作であると考えられる。

そこで、計算可能な設計過程モデルと同様に認知的設計過程モデルである設計サイクルと対応づけると図3.14の様になる。

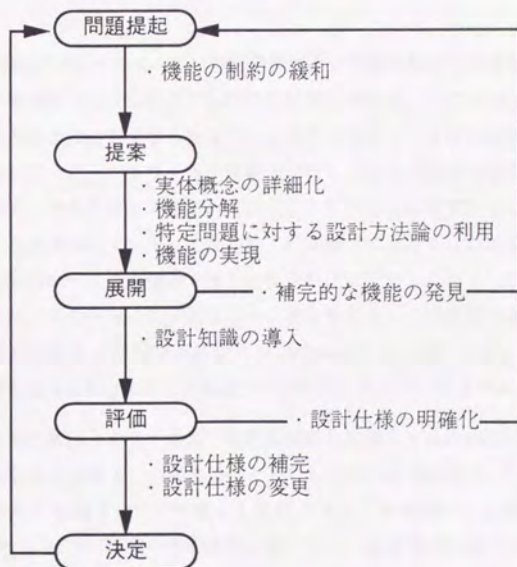


図 3.14: 設計知識操作論に基づく設計過程モデル

3.3 設計対象表現

本節では、前節で述べた設計知識操作を表現するために必要となる設計対象記述および設計対象の計算機上の表現である設計対象モデルを操作するための知識について議論する。

3.3.1 設計対象表現

前節で述べた設計知識操作を定式化するために必要となる設計対象表現について考える。

3.1.1項の定理17で述べたように、設計過程において設計解として想起されている実体概念に関する情報は必要に応じて段階的に詳細化される。このことは、設計の初期の段階ではその実体に対してどのようなデータ形式を用意しておけば良いかが決まらないことを意味している。つまり、各実体概念に対し、あらかじめ定型的なデータ形式が決まっていて、そのスロットを埋めていくような内包的記述では対応できない場合が存在することを意味している。すなわち、計算機上における設計対象表現が、各実体概念に対して詳細化された情報を各々の実体概念に段階的に付加していくような外延的記述により行なわれることが望ましいと考えられる。この設計対象表現における内包的記述と外延的記述に関する議論は[Tomiyama85a]に詳しいが、本研究の議論からも設計対象表現における外延的記述の有意性が示されていると考えられる。

また、設計操作知識7のような形で物理法則概念を導入するためには、設計対象に関連する膨大な量の知識を一つの知識ベースとして持つ必要がある。しかし、実際にはこれらの全ての知識を一つの枠組として扱えるような知識ベースは現在のところ存在していない。一方、実際の設計過程においては、設計者は形状モデル・電気回路のモデルといった個々の目的に応じた物理法則に基づく設計対象モデルを用いて作成し、解析することにより、設計解の分析、評価を行なっている。そこで、これらの複数の設計対象モデルを統合的に扱うことにより、各々のモデルが持つ知識を統合的に扱うことが必要である。この設計対象モデルにおいて設計対象モデルを操作するための知識については本節の最後に述べる。

さらに、設計知識操作9で述べたトレードオフを考慮した設計仕様の明確化過程を扱うためには、単純にある現象を発現するというような機能だけではなく、その機能の持つ価値に関する評価の基準を記述することが必要である。

3.3.2 設計対象モデル操作知識

本研究では、複数の設計対象モデルに分散された設計対象知識を統合的に用いることにより、物理法則概念の知識ベースと利用することを考える。この時、各設計対象モデルには各々固有の表現形式があるために、各モデルから個別に設計対象知識を取り出し、それらを組み合わせて推論を行なうことは不可能である。

そこで、設計知識操作7として定義した物理法則概念の導入の操作を、個々の設計対象モデルを単位とした操作として実現する(図3.15)。

また、このモデルを単位とした知識操作を考えるにあたり、設計対象モデルを「設計対象における物理現象の発現の解析を目的として、有限個の物理法則を計算可能な形で表現したもの」と定義する。また、設計対象モデルに関する概念を「抽象概念の一つであり、特に設計対象における物理現象の発現を解析するための計算機上の枠組に注目して成立する」と定義する。この定義と公理3から実体概念集合 S について設計対象モデル概念位相 T_m が考えられる。この時、設計対象モデルが扱うことのできる物理法則概念集合 $T_{M_k}^p = (P_1, P_2, \dots, P_{N_k}) \subset T_p$ (ただし、 P_i は物理法則概念)の関係は次のようになる。

$$T_k^m = \bigcup_{T_p \in T_{M_k}^p} T_p$$

この定義に基づき、設計知識操作7を次のように変更する。

設計知識操作7 実体概念の詳細化に基づく物理法則概念の導入(メタモデル位相空間のRefinement)

1. 物理法則概念 $T_{jk}^p (j = 1, 2, \dots, N_k)$ を扱う設計対象モデルに対応した設計対象モデル概念位相を T_k^m と、物理法則 $P_j(a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jN_j}) = 0$ (ただし、 a_{ji} は属性概念)に対応した物理法則概念位相を T_j^p と、属性概念 a_{ji}

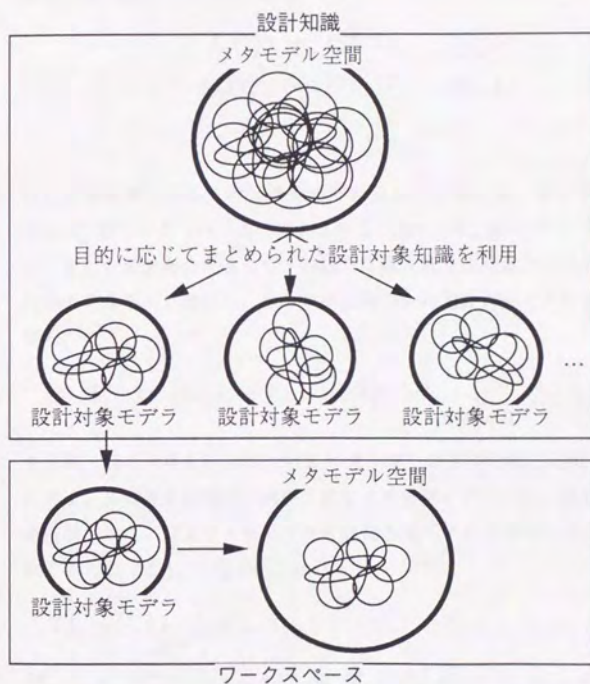


図 3.15: 設計対象モデルを単位とした知識操作

に対応する属性概念位相を T_{ji}^0 とする。また、設計対象モデラ概念集合の要素をそのモデラが扱う物理法則概念位相集合に写像する関数を f_{mp} 、物理法則概念集合の要素をその法則が関連する属性概念位相集合に写像する関数を f_{pa} とする。この時、設計対象モデラで扱うことのできる属性概念位相集合 $T_{M_k}^o$ は、次のようになる。

$$\begin{aligned} f_{pa}(T_j^p) &= \{T_{j1}^0, T_{j2}^0, \dots, T_{jN_j}^0\} \\ f_{mp}(T_k^m) &= \{T_{k1}^p, T_{k2}^p, \dots, T_{kN_k}^p\} \\ T_{M_k}^o &= \bigcup_{T_p \in f_{mp}(T_k^m)} f_{pa}(T_p) \end{aligned}$$

2. 設計知識操作1により実体概念が詳細化される際には、新たな属性概念集合 T_n^o がワークスペースに導入される。全て (N_m 個) のモデラ集合の中で、新たな属性概念が各モデラの扱える属性概念位相集合に含まれる設計対象モデラ集合を検索し、その中から幾つかの設計対象モデラ T_n^m を選択する。

$$T_n^m \subset \{T_m | T_m \in T_m, \exists T_0 \in T_n^o (T_0 \in \bigcup_{T_p \in f_{mp}(T_k^m)} f_{pa}(T_p))\}$$

3. さらに、ここで得られた設計対象モデラ T_n^m が持つ物理法則概念集合 T_n^p に含まれる物理法則概念が適用可能なメタモデルについて、物理法則概念を適用することによりメタモデルを進化させ、メタモデル位相空間を詳細化する ($(\tilde{S}_n', M_n') \rightarrow (\tilde{S}_{n+1}', M_{n+1}')$)。

$$\begin{aligned} T_n^p &= \bigcup_{T_m \in T_n^m} f_{mp}(T_m) \\ M_{n+1}' &= M_n' \cup \{M_{n+1} | M_n \in M_n', T_p \subset T_n^p, M_n \subset T_p, M_{n+1} = M_n \cap T_p\} \end{aligned}$$

次に、この設計知識操作に述べた設計対象モデラの利用について考える。設計対象モデラとは、設計者が設計過程における様々な問題に対処するために、設計者の頭の中にある設計解をモデル化するための枠組である。一般に計算機において対象をモデル化することは図3.16のように対象を形式的記述に定式化することである [Tsuji87]。言い替えると、設計対象モデルを作成することは、設計対象をそのモデルを作成する設計対象モデラに応じた形式的記述に変換することになる。ここで、これ

らの設計対象モデラを作成するに基礎となつた物理法則などの設計知識を背景理論と呼ぶ。

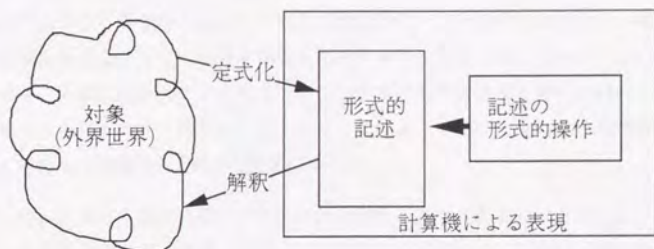


図 3.16: 対象の計算機上でのモデル化

そこで、設計対象モデラを用いて計算機上で設計対象をモデル化する操作を考える。まず、設計者が設計対象をモデル化するには、設計対象をどのような形で分割して表現するかを決める必要がある。例えば、ギアボックスをモデル化する際にギアボックス全体を一つの設計対象としてモデル化する方法や、ギアやシャフトの組合せとして表現する方法もある。このようなモデルを表現するための基底となる概念の詳細度を「粒度」と呼ぶ(図 3.17-(a))。

また、設計知識操作 7 に述べたように、一つの設計対象モデラにおいて扱うことのできる属性概念、物理法則概念はある背景理論に基づいた限定されたものである。そのために、設計者が設計対象を設計対象モデラで用いる形式的記述に変換するためには、その形式的記述の裏側に存在する背景理論を用いて設計対象を表現しなければならない。つまり、設計者は設計対象を各モデラで扱う概念のみを用いて設計対象を表現することが必要である。例を挙げると、棒にかかる応力を解析するための知識を使うためには、解析の対象とする設計対象に関する表現をその知識の裏側に存在する材料力学の理論と応力分布解析の式の基礎となっている「はり」や「固定端」といった材料力学での概念体系に変換する必要がある。ここでは、このような設計対象の持つ一部の属性に注目することにより特定の背景理論の持つ概念体系に対応付けることを「抽象化」と呼ぶ(図 3.17-(b))。

また、設計対象全体を評価するためには、設定した「粒度」に対応する設計対象の持つ全ての情報について「抽象化」を行なうことになるが、実際には、設計者は設計対象モデルを評価するための計算コストを考慮に入れて、情報の取捨選択をした設計対象モデルを作る場合がある。すなわち、設計解の一部をモデル化したり、結果に大きな影響を与えないような項目を無視してモデル化したりする。このように、設計者は、必ずしも設計対象モデルが扱うことのできる全ての設計解の情報を利用して設計対象モデルを作るわけではない。ここでは、このような設計対象の持つ情報を取捨選択する行為を「簡略化」と呼ぶ(図 3.17-(c))。

さらに、これらの操作に基づいて得られた概念に基づき形式的記述を行なうためのデータを設計対象モデルで用いる形式で入力する必要がある。この時には、他の設計対象モデルあるいは外界から得たデータを変換する必要がある(図 3.17-(d))。

つまり、設計対象モデルの作成は設計対象の「粒度」を決定し、「簡略化」した後、そのモデルが持つ概念体系に「抽象化」した後外界の情報もしくは他の設計対象モデルから「データ変換」を行ない形式的記述にする過程として定式化できる。

また、このデータ変換の過程において設計対象に関する情報が不足している場合には、設計者は設計対象モデルを作成する過程において必要な情報を付加している場合がある。

すなわち、設計対象のモデル化の支援をするためには、次の4点について取り扱う必要がある。

1. 粒度の取り扱い
2. モデルの簡略化の取り扱い
3. 背景理論に関する記述に基づく抽象化の支援
4. データの変換および必要なデータが存在しない場合の処理

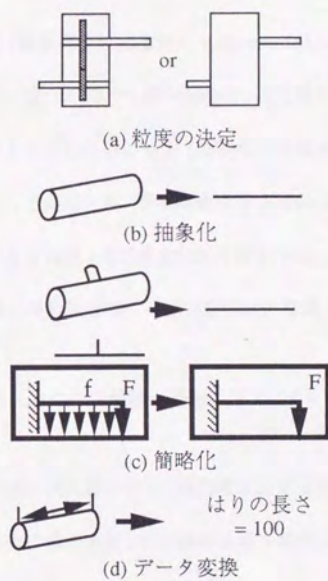


図 3.17: モデル化の操作

3.4 3章のまとめ

本章では、一般設計学の拡張である Refinement 設計過程モデルにおいて提案されていた設計者が考えている概念空間の Refinement 過程を、実際の設計実験のデータを基に分析することにより設計知識の操作として定式化した。この操作としては、次の9つがあげられる。

1. 実体概念の詳細化 (属性概念位相空間の Refinement)
2. 実体概念の詳細化に基づく設計仕様の明確化 (属性概念位相空間の Refinement)
3. 実体概念の比較による設計仕様の補完 (機能概念位相空間の Refinement)
4. 実体概念を媒介とした機能分解 (機能概念位相空間の Refinement)
5. 機能の実体概念による実現 (属性概念位相空間の Refinement)
6. 機能の制約の緩和と機能統合時の補完的な機能の発見 (機能概念位相空間の Refinement)
7. 実体概念の詳細化に基づく物理法則概念の導入 (メタモデル位相空間の Refinement)
8. 特定問題に対する設計方法論の利用 (属性概念位相空間の Refinement)
9. 設計解選択のための仕様の変更 (機能概念位相空間の Refinement)

そして、この分析に基づいた操作を認知的設計過程モデルと対応づけることにより設計知識操作論に基づく設計過程モデルを提案した。また、計算機上で行うために必要な設計対象の表現手法を提案した。さらに、設計対象を計算機上における表現へとモデル化する過程について分析し、モデリングの手順の中で行なう操作を分類した。

第 4 章

設計者の意図の記述

本章では、前章で述べた設計者の知識操作の結果作り出された情報を如何に表現するかを議論する。そこで、まず設計者の設計対象に対する主観的表現である機能モデリング全般について概観し、さらに本研究で利用するFBS(Function-Behavior-State)モデリングおよび品質機能展開について概略を述べる。次に、設計者の意思決定プロセスにおいて用いた情報を記述するために品質機能展開をFBSモデリングに応用する方法について述べる。最後に前章で述べた設計者の機能概念に対する知識操作を扱うためにFBSモデリングの拡張について述べる。

4.1 機能モデリング

機能とは設計者の主観を表すものであり、設計する製品において実現すべき目標である。そのために、1.3.1項で述べた様々な一般的な設計手順を述べた設計方法論においても、設計を始めるにあたり、その製品の果たすべき役割についての考察の必要性に加え、その結果を機能的な仕様として表現することが重要であることが指摘されている。そこで、本節ではまず、様々な機能モデリングについて概観する。さらに、本節の最後では本研究で利用するFBS(Function-Behavior-State)モデリングおよび品質機能展開(QFD)について詳しく述べる。

4.1.1 機能モデリングの研究

まず簡単に様々な設計方法論における機能の取り扱いについて概観する。多くの設計方法論において、機能はその製品において実現すべき目標を表現するものである。また、多くの設計方法論では、この目標である機能に対しては、いきなり実現方法を考えるのではなく、部分問題に分けて考える方が良いと考えており、そのために機能を階層構造により表現している。つまり、多くの設計方法論において機能表現は、設計仕様としての全体の問題に対する部分問題への切り分け方と密接につながりがある。

例えば、ドイツ流設計方法論[Rodenacker70, Pahl88]において、機能はエネルギーや情報の入出力の関係として捉えられる。つまり、機械をブラックボックスのように考え、ある決まった入力を別の出力に変換することを機能と考えた。このように考えると機能分解という操作は変換の過程を逐次的に分解することに相当する。また、この入出力の変換のパターンによって機構を整理することにより、機能と実現機構との対応づけを行なう。また、Suhの公理的設計方法論[Suh90]においては、機能の表現形式については特に定めていないが、“最高の”設計解を得るためには、機能の独立性を保つことが必要であることを述べている。

また、設計過程において、機能は設計解の持つ価値という観点から設計解を評価する基準としての側面を持つ。この機能の持つ評価基準としての側面について行なわれた研究としてはVA(Value Analysis)やVE(Value Engineering)の研究[Sannou86]

がある。これらの方法においては、機能に対して実現方法が複数考えられる場合に、各実現方法にかかるコストとその結果として得られる機能の価値を市場のニーズを考慮に入れながら比較することにより設計解を評価する方法を提案している。ドイツ技術者協会 (Verein Deutscher Ingenieure) による設計のガイドラインである VDI2225[VDI69] や Pahl と Beitz[Pahl88] はこれらの研究を基に評価基準の重み付けの方法とその評価基準に対する価値を考えることにより設計解候補を比較する方法を提案している。

以上の考察から、設計における機能モデリングの役割としては、設計における問題の切り分け方の方法論のための問題の表現手法としての役割と、設計対象の持つ価値の側面からのモデリングを行なう役割があり、その両方を取り扱うことが必要であると考えられる。

4.1.2 FBS モデリング

FBS(Function-Behavior-State) ダイアグラムとは、2.1節で述べた一般設計学における現実的知識に基づく設計の考え方を基礎として設計対象が持つ機能をモデリングする手法である。この FBS ダイアグラムでは、設計対象の機能 (Function) を機能の階層構造および機能と挙動 (Behavior) の関係、挙動と状態 (State) の関係により表現する [Umeda92]。また、4.1.1項で述べた設計における役割の分類から考えると、この手法の役割は問題の切り分け方の方法論のための問題の表現手法の役割に対応する。

この FBS ダイアグラムにおいて、状態とは「実体と属性及びその関係」によって定義される。この実体と属性は、一般設計学に従い次のように定義される。すなわち、実体とは世の中に存在するもの全てであり、属性とはその実体が持っている様々な物理的、化学的性質である。また、関係は属性や実体を関係付ける概念であると定義されている。

また、挙動は「一つ以上の状態の列」によって定義される。この挙動は、「実体の状態がある物理的条件を満たす時に、実体の物理的挙動 (状態変化) を決定する知識」である「物理法則」により規定されていると仮定する。この様な状態と挙動の関係を

「挙動・状態関係」と呼ぶ。

また、機能は「その利用を目的として、人間によって認識された挙動の抽象的表現」と定義される。この様な挙動と機能の関係を「機能・挙動関係」と呼ぶ。さらに、機能間の全体・部分関係や抽象・具体関係などにより、機能構造が階層化され表現される。

この機能間の階層関係・機能・挙動関係・挙動・状態関係を表現したものをFBSダイアグラムと呼ぶ(図4.1)。

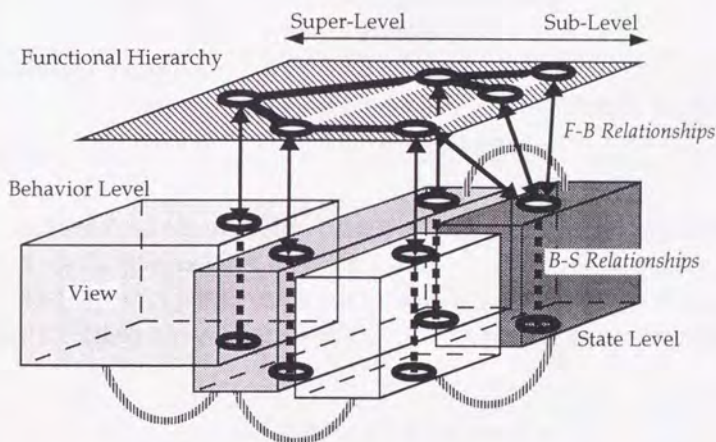


図 4.1: FBS ダイアグラム [Umeda92]

また、このFBSダイアグラムを用いて概念設計段階における設計対象のいわゆる基本構造を決定する作業を支援するツールとしてFBSモデラが作成されている[Umeda92]。FBSモデラにおいて、挙動・状態は、フィジカル・フィーチャ[Kiriyama91]によって表現される。フィジカル・フィーチャとはある起こしたい物理現象とその現象を起こすために必要な機構の組み合わせによって表現される。このフィジカル・フィーチャにおいて、物理法則に基づいて起きる物理現象に関する知識は定性プロセ

ス理論 [Forbus84] に基づいて図 4.1 に示す形式で記述される。

表 4.1: 物理現象の定義

項目	小項目	内容
name		名前
supers		上位階層の概念の名称
conditions	prerequisites	この概念がアクティブになる前提となる概念
	reference	前提となる prerequisites 間の関係
	q-conditions	パラメータ値の前提条件
influences	quantities	対象に付加されるパラメータ
	q-relations	対象に付加されるパラメータ間の定性比例、反比例関係
	influences	対象に付加される定性微分関係

FBS ダイアグラムにおける挙動-状態関係はこの定性プロセス理論に基づいた定性推論システム [Kiriya91] を用いて挙動シミュレーションを行なうことにより関係付けられる。そして、機能の階層構造および機能-挙動関係は機能プロトタイプの知識をもとに関係付けられる。この機能プロトタイプの知識は表 4.2 の形式で表現される。

表 4.2: 機能プロトタイプの定義

名前	動詞 + 目的語
展開方法	サブ機能のネットワーク
実現挙動	フィジカル・フィーチャ

FBS モデラは要求仕様である機能から機能分解および機能と挙動間の関係づけを行なうことにより FBS ダイアグラムを構築する設計過程を支援することができる。この FBS モデラによる設計は次の手順によって行なわれる。

1. 設計仕様の入力

ユーザーは機能プロトタイプの幾つかを設計仕様として選択する。

2. 機能階層構造の構築

ユーザーは設計仕様として与えられた機能プロトタイプについて、展開方法に関する知識を利用することにより、詳細なサブ機能群へと分解し、機能階層構造を構築する。

3. 実現挙動の選択

機能階層構造を構築した後、設計者は各サブ機能に対して実現挙動を選択する。さらに、全体の機能を発現する実現挙動を作るために、各サブ機能に対応付けられたフィジカル・フィーチャを組み合わせ、設計対象全体のモデルを作成する。

4. 挙動シミュレーションによる検証

定性推論システムを用いることにより全体の挙動シミュレーションを行ない、望まれた物理現象の生起および、望まれた状態遷移が起きているかを調べることにより、構築されたダイアグラムの妥当性を検証し、問題がある場合は2.または3.の手順に戻る。

4.1.3 品質機能展開

品質機能展開(QFD)とは設計対象である製品について、設計の源流から始まる全てのプロセスで品質を保証するための総合的品質管理の手法である[Akao90]。このQFDを4.1.1項で述べた機能モデリングの役割の分類から考えると、設計対象の持つ価値の観点からのモデリングに対応する。ここでは、[Akao90, Oono90, Oono94]を基に品質機能展開についての概略を説明する。

品質機能展開とは製品開発における品質保証を設計の源流から行なうための手法である。つまり、製品のどの品質を保証すべきかという点を設計の初期の段階から考え、それを踏まえた上で機能設計や詳細設計を行なうための手法である。そのためには、市場が要求する品質と設計の各段階で考慮すべき項目との関係を明らかにする必要がある。そのために、品質機能展開では次の4種類の展開を順番に行なうことにより、市場の要求する品質と設計者が各段階で考慮する項目との関係を明確にする。

1. 品質展開
2. 技術展開
3. コスト展開
4. 信頼性展開

以下では、この各展開について概略を述べる。

品質展開とは顧客要求を設計者などの技術者が使う言葉に変換する展開である。この展開を始めるにあたり市場調査部門により顧客が考慮する製品に対する品質を調査する。このような顧客が考慮する品質としては、「見ための良さ」「なめらかに動く」といったものがあり、このような顧客の要求を言語表現したものを要求品質と呼ぶ。これに対し、「重量」「寸法」といった製品の品質を評価する尺度となりうる技術的な要素を品質要素と呼ぶ。

品質展開では、顧客の要求である要求品質を設計者などの技術者が使う品質要素に対応付ける。

1. 市場を調査することにより、製品に対する顧客の要求を明らかにし、さらに顧客がどの要求を重用視しているかを要求品質間の相対重用度 (RI) として表現する。この相対重要度は AHP (Analytic Hierarchy Process) 法 [Tone86] を用いて次の手順により計算される (図 4.2)。
 - (a) 各要求品質を一对比較し、重要な要求品質には 5 ~ 1 の点数を与え、比較的重要なでない要求品質にはその逆数 ($1 \sim 1/5$) を点数として与える。
 - (b) 全ての要求品質間について比較をした後、各要求品質について、この点数の相乗平均およびその値の合計を計算する。
 - (c) 相乗平均の合計で各相乗平均の値を割った後に 10 倍した値を各要求品質の相対重要度とする。
2. 設計者は製品の品質に影響を与える品質要素を明らかにし、各品質要素が要求品質に与える影響を数値で表現することによりマトリックスを作成する。この

	使いやすい	見た目がよい	長持ちする	相乗平均	相対重要度
使いやすい	1	3	5	2.46	6.37
見た目がよい	1/3	1	3	1	2.59
長持ちする	1/5	1/3	1	0.40	1.03
合計				3.86	

逆数

5…重要、3…若干重要、1…同じ

$\sqrt[3]{\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{5} \cdot 1}$

図 4.2: AHP 法による相対重要度の決定

結果得られる展開表を要求品質*品質要素展開表 (HQM) と呼ぶ。顧客の要求を表現している要求品質の相対重用度は次の式を用いることにより各品質要素の重要度を示す重み付け (WQE) に変換される。

$$\overrightarrow{WQE} = {}^t[HQM] \overrightarrow{RI}$$

3. 品質要素の重みが相対的に高いものが重要品質要素として認識される。

技術展開では、品質展開で得られた品質要素およびその重み付けを基に製品の持つべき機能との対応づけ、さらにその機能をどのような機構によって実現するかを決定する展開である。ここで、機能は VE(Value Engineering)[Sannou86] で用いられる機能と同じように「○○を△△する」(「○○」は名詞であり、「△△」は動詞である) という形で表現される。

1. 設計者は機能展開を行なうことにより設計対象の機能的仕様をより詳細なサブ機能群へと分解し機能展開表を作成する。
2. 機能展開の結果得られたサブ機能と品質要素の間で品質要素*機能展開表 (QFM) と呼ばれる展開表を作成する。この展開表では要求品質*品質要素展開表と同様にお互いの項目間の影響の度合を数値で表現する。この展開表に基づき品質要素の重み付けは次の式により機能の重み付け (WF) へと変換される。

$$\overrightarrow{WF} = [QFM] \overrightarrow{WQE}$$

3. 機能の重みが相対的に高いものが重要機能として認識される。
4. 機能展開の結果得られたサブ機能の実現構造を考えることにより製品の実現構造である機構群を得る。要求品質*品質要素展開表
5. このサブ機能と機構群の間で機能*機構展開表(FMM)と呼ばれる展開表を作成する。この展開表でも要求品質*品質要素展開表と同様にお互いの項目間の影響の度合を数値で表現する。この展開表に基づき機能の重み付けは次の式により機構の重み付け(WM)へと変換される。

$$\overrightarrow{WM} = {}^t[FMM]\overrightarrow{WF}$$

6. 機構の重みが相対的に高いものが重要機構として認識される。

図4.3はライターの設計を例として品質展開および技術展開で作られたQFDの展開表である。この展開表において概念間の影響は5から1の数字(5…強い関係、3…関係あり、1…関係が予想される)で表されている。

この展開表により得られた重要品質要素、重要機能、重要機構と実際の設計解を比較することにより設計解が市場の要求を反映しているか否かを調べることができる。

また、コスト展開とは、技術展開で得た機構の重みを基に、各機構についてどれくらいのコストをかけることができるかを検討する展開であり、信頼性展開とは、品質展開で得た保証すべき要求品質についてFTA(故障木解析)を行なう。設計者は、これらの展開を通じ、製品の確実な品質保証を限られたコストの中で実現するための検討を行なう。

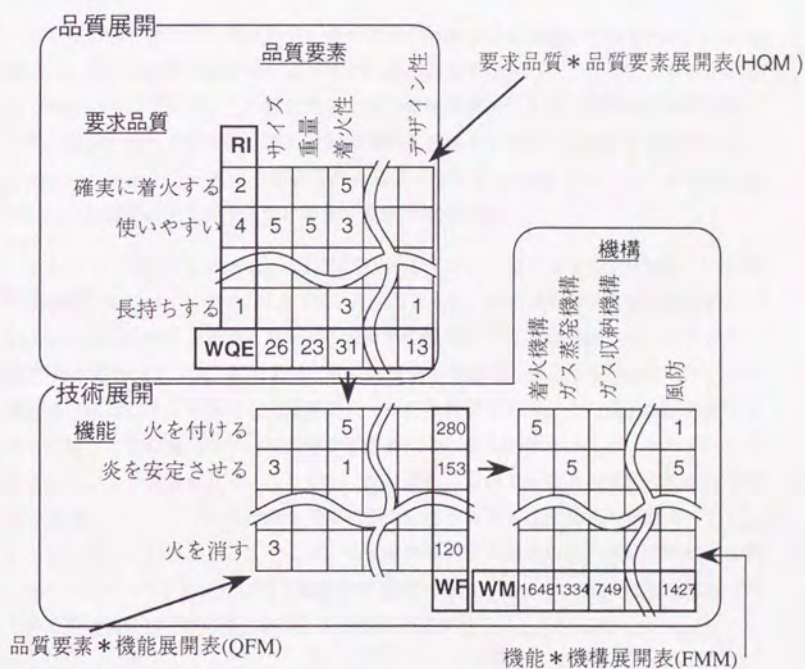


図 4.3: ライターの設計を例として作られた展開表

4.2 機能およびその評価基準の記述

設計者がある製品を設計する場合には、その製品においてある一定のことを実現したいと考えている。そこで本研究では、この設計者がその設計物で実現しようと考えていることを設計者の意図と呼ぶ。

この設計者の意図が一番現れているのが設計対象の機能的設計仕様である。この仕様には、設計者がその設計物によってどのような価値を生み出そうとしているのかが記述されている。そこで、この設計対象に対する機能的記述をする枠組が必要である。一方、前節で述べたように、設計対象の機能を表現する方法にも様々な方法が存在しているが、本研究と同様に一般設計学を基礎としているFBSモデリングを設計仕様に対する問題分割を支援するための機能表現に利用する。

また、この機能的設計仕様は3.1.2項で述べたように、設計者は設計を進めていく中で明確化されていく。また、3.1.5項で述べたように、設計解に対する要求が増加していくにつれ、すべての要求を満足する設計解を実現することは困難になる。そこで、定理20に述べたように、設計者はこれらの要求を考慮し、優先度を付けることにより機能概念位相空間を詳細化し、最終的に一つの設計解を得る。この時、複数の要求に対して付けられた優先度は、設計者が設計解にどのような特徴を与えようとしているかを示していると考えられる。すなわち、設計過程において複数の設計解候補からどのような基準によって一つの設計解を選んだかを記述することは設計者の意図の一面を記述したことになると考える。そこで、品質機能展開法を機能の持つ価値の側面からのモデリングをFBSモデリングと統合して利用することにより、設計者の意図の一部である設計解候補選択の際に利用した情報の記述を行なう。

4.2.1 品質機能展開法のFBSモデラへの応用

4.1.2項で述べたFBSモデラで記述可能な機能は、単純にある現象を発現するという種類の機能だけであり、3.3節で述べた機能の持つ価値に関する評価の基準が記述できない。また、このFBSモデラでは、一つの設計対象のみを表現するので、設計過程において考慮された他の設計解候補を記述することができない。

また、単純に設計過程で考慮された解候補を履歴として記述したとしても、解候補の選択の理由が記述されていないと、他の解候補が設計解として選ばれなかった理由が不明であり、その履歴を理解し再利用するための情報としては不足である。よって、このFBSモデラの設計結果を他の人にわかる形で表現するためには、設計過程において考慮された他の設計解候補および、設計解の選択の理由を記述する必要がある。

それに対し、4.1.3項で述べた品質機能展開(QFD)では、市場の要求との関連において設計解を分析評価する。すなわち、QFDにおいて用いる市場の要求とは、設計解の持つ価値を評価する基準であり、設計者はその基準に基づいて設計を行なうことが求められている。よって、この市場の要求の情報は、前項で述べた設計者の意図の一つである設計解の特徴を与える際の基本となる情報であると考えられる。そこで、本研究では、QFDで表現される市場の要求に基づいて、FBSモデラにおける設計者の解の選択の根拠を記述する枠組を提案する(図4.4)。

一方、QFDでは、設計対象の特徴を表すパラメータである品質要素の設定などが必要であるが、概念設計などの新しい設計解自体を生み出そうとする時期には設計解の構造が定まっておらず、うまく適用できない。そこで、FBSモデラによる設計結果を用いたQFDの展開表作成支援を行なう(図4.4)。

このようにして得られたFBSモデラとQFDツールを統合した枠組をFBS+QFDシステムと呼ぶ。

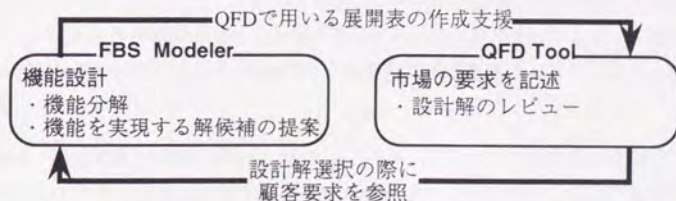


図 4.4: FBS モデラと QFD の統合

次に、この枠組を実現し、図4.4に述べた操作を支援するための知識について議論

する。そこでまず、QFD に表現された市場の要求を利用して設計候補を比較することを考える。3.1.5項で述べたように、設計者は設計解を選択する過程において複数の評価基準を用いて設計候補について分析し、評価基準間に重み付けをして、幾つかの評価基準については緩和し、幾つかの評価基準については絞り込んでいると定式化した。

そこで本研究では、設計者によるこの評価基準間の重み付けは、市場の要求を反映していると考え、要求品質の相対重要度と関係があると考え。一方、FBS モデラにおいて各機能を実現する候補はフィジカル・フィーチャで表現されているので、このような設計候補選択の過程を支援するためには、各フィジカル・フィーチャについて各々の評価基準に対する評価の結果が記述されている必要がある。

また、QFD の展開表の作成支援について考える。4.1.3項に述べたように品質展開・技術展開の段階で作成する QFD の展開表には、次の3つがある。

- 要求品質*品質要素展開表
- 品質要素*機能展開表
- 機能*機構展開表

これに対し、FBS モデラによる機能設計の結果としては、機能展開の結果得られたサブ機能および機能の実現方法であるフィジカル・フィーチャに関する情報が得られる。フィジカル・フィーチャは実現挙動を起こすための機構に関する情報を持っているので、QFD の展開表の上では機構と対応付けることができる。よって、機能*機構展開表はFBS モデラにおける機能と実現挙動の関係を利用することにより作成できる。

次に、品質要素と機能の関係について考えると、この関係は設計解の実現方法に依存していると考えられる。例えば、一つの機能に対して電氣的に実現する方法と機構的に実現する方法が存在した場合には、実現方法の選び方によって品質要素は異なる。よって、品質要素と機能の関係を一義的に記述することは困難である。一方、設計解の実現方法である機構が決まった段階で品質要素を考えることや、その機構に対する評価を行なうことは可能であると考えられるので、機構に対する要求品質*品質

要素展開表を記述することは可能であると考え。また、この情報は機構と品質要素の関係述べているので、この情報とFBSモデラの機能と実現挙動の関係を用いると機能と品質要素の関係に関する情報を得ることができる。

以上の議論から、設計解候補の評価およびQFDの展開表を作成するための知識(機構知識と呼ぶ)の記述を表4.3の形式によって行なうこととする。この知識は、FBSモデラにおける実現挙動であるフィジカル・フィーチャに対応する知識であり、その機構に対して作られる要求品質*品質要素展開表および展開表に記述されている各要求品質に対してを点数(5点…満足、3点…普通、1点…不満)で表示した満足度の2つが含まれる。

表 4.3: 機構知識

名前	フィジカル・フィーチャの名前
要求品質*品質要素展開表	機構に対応する要求品質*品質要素展開表
満足度	上記の展開表に記述されている要求品質に対する満足度

機構知識を用いた解候補の評価

この枠組において設計者の解候補選択は、市場の要求である要求品質の相対重要度を反映していると考えている。そこで、本枠組ではPahlとBeitz [Pahl88]が提案している設計解評価の方法と同様に、複数の評価基準間の重み付けと解候補の評価結果を用いて解候補の評価を行なう。すなわち、本枠組では、要求品質の相対重要度と、各解候補の要求品質に対する満足度を利用して解候補の評価を行なう。つまり、相対重要度が高い要求品質に対する満足度が高いものが、良い評価になるような評価の枠組を考える。

一方、実際の製品を考えると、一つの製品の中においても様々なタイプのモーターやベアリングが用いられるように、ほぼ同じ機能に対して様々な機構が対応付けられている。このことは、設計解を実現する機能を詳細に分解していく段階において、各機能が全体に対してどのような影響を与えるかを考慮した結果であると考えられる。そ

こで、実際に解候補を評価する段階では、その各々の部分が全体に対してどのような影響を与えるかを考える必要があり、ユーザーがその値を入力することとする(特に設定がない場合には1を利用する)。

また、基本的に、要求品質に対する満足度に関する情報については、FBS+QFDシステムが機構知識から獲得する。しかし、3.1.5項でも述べたように、設計解の評価基準は解候補として想起された設計解に応じて増える場合があり、このようにして増えた評価基準に対して、他の設計解候補については満足度が設定されておらず、必要な情報を獲得することができない。そこで、このような場合には、このようにして増えた評価基準である要求品質について他の全ての解候補を評価し、ユーザーが個別に他の解候補と比較して満足度の設定を行なうこととする。

このようにして得られた満足度から、FBS+QFDシステムは以下の式を用いて解候補を評価し、この評価の結果の値が大きいものが設計解として選択され、全ての設計解候補に対する評価の結果が設計解選択の根拠としてシステムに記録される。

$$\text{解候補の評価値} = \sum_{i=1}^n GA_i \times RI_i \times SD_i$$

ただし GA_i は解候補が i 番目の要求品質全体に対して与える影響の割合、 RI_i は i 番目の要求品質の重要度、 SD_i は i 番目の要求品質に対する満足度、 n は関連する全ての要求品質の数である。

機構知識を用いた QFD 展開表の作成支援

次に、FBS モデラにおける機能設計の結果と機構知識を用いた QFD 展開表の作成支援を考える。ここでは、ライターの一部に対する QFD 展開表を例にとり(図 4.5)説明を行なう。

1. FBS+QFD システムは、各サブ機能に対応して選択された設計解候補について機構知識に記述された要求品質*品質要素展開表を組み合わせることにより、全体の要求品質*品質要素展開表を作成する。システムは、各サブ機能に対応したフィジカル・フィーチャーの機構知識を用いることにより、これらの知識に含まれる全ての要求品質、全ての品質要素を展開表の要素として利用する。